



Filipe Cunha Marques

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Metodologia TRIZ Aplicada ao
Desenvolvimento de uma Estufa
“Inteligente” Energeticamente
Sustentável**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Helena Víctorovna
Guitiss Navas, Professora Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2017

**Metodologia TRIZ Aplicada ao Desenvolvimento de uma Estufa “Inteligente”
Energeticamente Sustentável**

Copyright

Filipe Cunha Marques - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à Professora Doutora Helena Víctorovna Guitiss Navas, pela orientação dada a este trabalho, pelos conhecimentos transmitidos e pela disponibilidade que sempre demonstrou ao longo destes meses. O método TRIZ ganhou definitivamente um grande admirador.

À minha família, ao meu Pai e à minha Mãe, aos meus irmãos Manuel e Catarina. Aos meus mais queridos avós, Palmira, Ezequiel e Maria Amélia. A toda esta forte família Cunha e Marques.

À Teresa, o meu amor incondicional. À grande e verdadeira amizade que fiz pelo mundo fora. A todos os meus grandes amigos que me acompanharam pelos felizes momentos da minha vida e por essa amizade para sempre marcada na minha memória.

Em especial ao meu avô Ezequiel, pela sua surpreendente capacidade criativa e engenhosa que sempre me fascinou.

A eles, dedico-lhes todo este trabalho.

RESUMO

A necessidade de se praticar uma agricultura ambientalmente sustentável e geradora de alimentos seguros para o consumidor nunca foi tão elevada como na conjuntura atual das alterações climáticas. As estufas agrícolas devem ser dotadas de novas tecnologias que proporcionem uma utilização mais racional de recursos cada vez mais escassos e dispendiosos, garantindo níveis de produção crescentes. Desta forma, pretende-se desenvolver uma estufa energeticamente sustentável.

Foi realizada uma análise crítica das estufas agrícolas existentes no mercado, foram identificados os problemas recorrentes e algumas oportunidades de melhoria. A seguir à análise, foram elaboradas algumas propostas de melhoria que foram conceptualizadas num novo modelo de estufa. O novo modelo visa a intensificação da produção biológica de uma forma sustentável e autónoma, dotada de uma adaptação automática às alterações dos parâmetros ambientais externos. Na análise dos problemas (contradições) e na conceção do sistema em estudo, recorreu-se à Teoria da Resolução Inventiva de Problemas, devido às suas potencialidades no auxílio da criação de sistemas inovadores.

O novo modelo de estufa resolve o problema da sazonalidade das estufas convencionais, permitindo a produção contínua para o ano inteiro, a redução do tempo de cada ciclo de produção e, conseqüentemente, o aumento do número de ciclos de produção por ano. Os custos operacionais da estufa proposta são consideravelmente mais reduzidos que em estufas tecnologicamente mais avançadas existentes no mercado. O controlo e a monitorização dos parâmetros ambientais e do crescimento das culturas são garantidos por sistemas automatizados, sendo somente necessária a intervenção humana na plantação e na colheita das culturas.

O modelo proposto pressupõe a adaptabilidade da estufa às condições de irrigação do local, proporcionando o consumo eficiente de água. A estufa em estudo concentra a energia solar gerada no controlo e na produção agrícola, potenciando o aumento do fotoperíodo das plantas. É esperada independência energética da estufa com a possibilidade de venda do excesso de produção de energia à rede de distribuição pública. No caso de estudo apresentado, foi possível estimar uma redução de cerca de 50% de consumo de energia elétrica relativamente às estufas tecnologicamente avançadas existentes no mercado e uma redução total do consumo elétrico para produções agrícolas mais simples.

Palavras-chave: TRIZ, Análise Substância-Campo, Agricultura Protegida, Estufa Inteligente, Energias Renováveis, Estufa Autossustentável.

ABSTRACT

In the current climate change conjuncture, practice environmentally sustainable and food-safe agriculture has never been so needed. Agricultural greenhouses should be equipped with new technologies which will make more rational the use of increasingly scarce and costly resources to ensure increased levels of production. By this, it will be develop an energetic self-sufficient greenhouse.

A critical analysis of the existing agricultural greenhouses in the market was carried out, the recurrent problems and some opportunities for improvement were identified. Following the analysis, some improvement proposals were made to conceptualized in a new greenhouse model. The new model aims to intensifying organic production in a sustainable and autonomous way, with full automatic adjustments of optimum internal environmental parameters. In the analysis of the problems (contradictions) and in the design of the system under study, the Theory of Inventive Resolution of Problems was used, due to its potentialities in the aid of the creation of innovative systems.

The new greenhouse model solves the problem of the seasonality happening in some conventional greenhouses, allowing continuous production for the whole year, reducing the time of each production cycle and consequently increasing the number of production cycles per year. The operating costs of the proposed greenhouse are considerably lower than in more technologically advanced greenhouses in the market. Control and monitoring of environmental parameters and crop growth is ensured by automated systems, and human intervention is required only on planting and harvesting the crop.

The proposed model presupposes the adaptability of the greenhouse to the local irrigation conditions. The study greenhouse concentrates the solar energy generated on the control and in the agricultural production, making possible the extension of photoperiod of plants. Energy independence from the greenhouse is expected with the possibility of selling excess energy production to the public distribution network. In a case study, it was possible to estimate a reduction of about 50% in electricity consumption compared to technologically advanced greenhouses in the market and a total reduction of electricity consumption for simpler agricultural techniques.

Keywords: TRIZ, Substance-Field Analysis, Protective Agriculture, Intelligent Greenhouse, Renewable Energies, Sustainable Greenhouse.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e objetivos do estudo.....	1
1.2 Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2 – Teoria da Resolução Inventiva de Problemas.....	3
2.1 Introdução à metodologia TRIZ.....	3
2.2 Características e conceitos fundamentais da TRIZ..	5
2.3 Principais ferramentas e técnicas da TRIZ.....	7
2.3.1 Princípios de invenção e matriz de contradições.....	7
2.3.2 Análise Substância-Campo.....	9
2.3.3 Algoritmo de Resolução Inventiva de Problemas.	13
Capítulo 3 – Análise da problemática de estufas agrícolas ...	17
3.1 Estufas agrícolas para produção industrial	17
3.1.1 Classificação das EA's	18
3.1.2 Critérios de dimensionamento segundo a norma EN 13031-1	20
3.1.3 Posicionamento e orientação de estufas .	21
3.1.4 Tipos de estruturas.....	23
3.2 Disponibilidade energética	25
3.3 Análise de mercado	26
3.3 Identificação de problemas e oportunidades de melhoria em estufas agrícolas	29
Capítulo 4 – Propostas de melhoria.....	33
4.1 Definição dos requisitos e das características da estufa autossustentável	33
4.2 Configuração da estufa e dos componentes	35
4.2.1 Produção elétrica na estufa agrícola.....	55
4.2.2 Inclusão de um sistema de baterias no fornecimento elétrico da estufa	61
4.2.3 Ligação à rede pública de distribuição elétrica..	63
4.3 Análise comparativa das estufas existentes e da estufa agrícola proposta	63
4.3.1 - Caso Prático: Uniformização de produção para o ano inteiro.....	67
Capítulo 5 – Conclusões.....	71
5.1 Trabalho futuro.....	72
Referências bibliográficas	73

Anexos.....	77
Anexo A - Especificações do LED usado no sistema de iluminação.....	77
Anexo B - Produção fotovoltaica da EA “inteligente” de 300 m ²	78
Anexo C - Produção fotovoltaica de uma EA de 150 m ²	79
Anexo D - Especificações do vidro fotovoltaico.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma de resolução de problemas	4
Figura 2.2 - Evolução da idealização nos dispositivos móveis.	6
Figura 2.3 - Sistema completo.....	9
Figura 2.4 - Diferentes etapas para a construção de um modelo funcional.....	9
Figura 2.5 - Situação problemática 1: sistema incompleto	10
Figura 2.6 - Situação problemática 2: sistema com efeito indesejado ou prejudicial.....	10
Figura 2.7 - Situação problemática 3: sistema com efeito insuficiente ou ineficiente.....	11
Figura 2.8 - Solução geral 1 para a situação problemática 1.....	11
Figura 2.9 - Solução geral 2 para a situação problemática 2.....	11
Figura 2.10 - Solução geral 3 para a situação problemática 2.....	12
Figura 2.11 - Solução geral 4 para a situação problemática 2.....	12
Figura 2.12 - Solução geral 5 para a situação problemática 2.....	12
Figura 2.13 - Solução geral 6 para a situação problemática 2.....	13
Figura 2.14 - Solução geral 7 para a situação problemática 2.....	13
Figura 2.15 - Ferramenta ARIZ.....	14
Figura 3.1 - Estufa básica.....	18
Figura 3.2 - Estufa dotada de sistemas semiautomáticos	19
Figura 3.3 - Estufa dotada de automatismo de irrigação.....	19
Figura 3.4 - Estufa dotada de sistema automáticos.....	20
Figura 3.5 - Percurso solar no Verão e no Inverno no hemisfério norte.....	22
Figura 3.6 - Estufa destruída pelo vento.....	22
Figura 3.7 - Tipos de estrutura de uma EA.....	23
Figura 3.8 - Tipo de climas na agricultura.....	27
Figura 3.9 - Estufas agrícolas de Almeria, Espanha.....	28
Figura 4.1 - Sensores, processadores e atuadores para um ambiente interno ideal.....	34
Figura 4.2 - Ilustração da passagem de luminosidade usando vidros fotovoltaicos numa EA....	36
Figura 4.3 - Percurso solar no Inverno.	36
Figura 4.4 - Reflexão de luz visível ao olho humano versus leitura infravermelha ...	38
Figura 4.5 - Posicionamento do sensor de IV.	38
Figura 4.6 - Posicionamento do sensor temperatura, humidade e luz.....	39
Figura 4.7 - Processamento de dados	40
Figura 4.8 - Equação ilustrada da fotossíntese	41

Figura 4.9 - Espectro do comprimento de onda para a fotossíntese ...	41
Figura 4.10 - Diferenças de crescimento do crisântemo	42
Figura 4.11 - Horas de sol diárias para 2012 e 2013 em Lisboa	43
Figura 4.12 - Diferenças entre as plantas de dia curto e de dia longo.	44
Figura 4.13 - Ilustração da contradição entre substâncias.....	46
Figura 4.14 - Colocação de sensores e atuadores sem contradições.	46
Figura 4.15 - Variação das temperaturas diárias numa estufa... ..	49
Figura 4.16 - Exemplo de ventilação passiva com recurso a uma janela zenital	50
Figura 4.17 - Relação entre a renovação de ar por hora e a humidade relativa dentro da estufa..	51
Figura 4.18 - Sistema de ventilação da EA sem qualquer contradição substancial....	52
Figura 4.19 - Diagrama com o sistema de irrigação incluído.. ..	53
Figura 4.20 - Sistema de sombreamento da EA "inteligente".....	53
Figura 4.21 - Posição dos vidros fotovoltaicos na EA em Solidworks.....	55
Figura 4.22 - Declinação solar durante os 365 dias do ano.....	56
Figura 4.23 - Posicionamento dos módulos fotovoltaicos em relação à trajetória solar.....	56
Figura 4.24 - Irradiação solar anual em função do azimute e da declinação solar.....	57
Figura 4.25 - Sombreamentos na estrutura da estufa.....	58
Figura 4.26 - Produção elétrica mensal de uma EA de 300 m ² em Lisboa.....	60
Figura 4.27 - Esquema do sistema elétrico <i>off-grid</i> da EA.....	62
Figura 4.28 - Diagrama da solução final.....	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Cinco níveis inventivos de Altshuller	4
Tabela 2.2 - Parâmetros técnicos segundo TRIZ.....	8
Tabela 2.3 - Princípios de invenção da TRIZ.....	8
Tabela 2.4 - Notação utilizada nos modelos de Substância - Campo.....	10
Tabela 3.1 - Tempo de vida mínimo para um projeto de estufa segundo a norma EN 130311...21	
Tabela 3.2 - Potência de uma EA.....	26
Tabela 3.3 - Potência elétrica em função da dimensão de uma EA.....	26
Tabela 3.4 - Estimativa da área de utilização de estufas nas diferentes regiões do mundo.....	27
Tabela 3.5 - Explorações e área base com culturas hortícolas por região.....	28
Tabela 4.1 - Coeficiente de transferência de calor para cada tipo de material.....	47
Tabela 4.2 - Perdas de calor.....	48
Tabela 4.3 - Descrição elétrica.....	59
Tabela 4.4 - Dimensões físicas do vidro fotovoltaico.....	59
Tabela 4.5 - Limites operacionais.....	59
Tabela 4.6 - Estimativa de produção energética anual.....	60
Tabela 4.7 - Custo operacional reduzido pelo autoconsumo elétrico.....	64
Tabela 4.8 - Redução do consumo da energia elétrica.....	64
Tabela 4.9 - Estimativa da atuação dos dispositivos automáticos.....	65
Tabela 4.10 - Distribuição do consumo de energia elétrica na EAI.....	65
Tabela 4.11 - Custos operacionais relativos ao consumo de energia elétrica	66
Tabela 4.12 - Condições de produção.....	67
Tabela 4.13 - Dados relativos aos dispositivos utilizados nas duas estufas.....	68
Tabela 4.14 - Comparação da EAI com uma estufa <i>High Tech</i>	69
Tabela 4.15 - Comparação dos custos elétricos para a produção de tomate.....	69
Tabela 4.16 - Retorno Financeiro.....	70
Tabela A.1 - Especificações do vidro fotovoltaico.....	80

SIGLAS E ABREVIATURAS

ARIZ – Algoritmo de Resolução Inventiva de Problemas

EA – Estufa agrícola

EAI – Estufa agrícola “inteligente”

ELS – Estado Limite de Utilização

ELU – Estado Limite Último

NIR – *Near-Infrared*

OD – *Oxygen demand*

OMIE – Operador de Mercado Ibérico de Energia

ORP – *Oxidation Reduction Potential*

PAR – *Photosynthetically active radiation*

PPFD – *Photosynthetic photon flux density*

PSL – Ponto de Saturação Luminosa

PVGIS – *Photovoltaic Geographical Information System*

RFI – Resultado Final Ideal

STC – *Standard Testing Conditions*

TDS – *Total Dissolved Solids*

TRIZ – Teoria de Resolução Inventiva de Problemas

SIMBOLOGIA

A – Área de superfície do calor transferido

q – energia térmica

U – Coeficiente de transmissão térmico

ΔT – Diferença das temperaturas no interior da estufa e no exterior

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo, pretende-se clarificar o enquadramento da dissertação e os objetivos a alcançar e onde se apresenta a estrutura geral da dissertação onde se desenvolverá uma estufa inteligente e autossustentável através da metodologia TRIZ.

1.1 – Enquadramento e objetivos do estudo

Na conjuntura atual de alterações climáticas, diminuição da área de terras aráveis disponíveis e perante a necessidade de uma agricultura ambientalmente sustentável e geradora de alimentos seguros para o consumidor, a necessidade de cultivar mais e bem nunca foi tão elevada. É necessário, e a própria indústria o exige, cada vez mais soluções produtivas de modo a alimentar a crescente população mundial e satisfazer o vasto sector da horticultura. As estufas agrícolas são a base desta dissertação, sobre a qual, recairá uma fundamentada atenção no caminho a percorrer para intensificar a produção de alimentos biológicos de uma forma ecológica e sustentada.

Custos energéticos e produtividade são dois fatores interligados nos sectores de atividade económica. A escalada do preço dos combustíveis fósseis e a pressão dos consumidores com vista à diminuição dos níveis de carbono na nossa atmosfera, leva produtores a procurar métodos mais eficientes para a sua produção em estufas agrícolas. Muitos desses métodos resumem-se em novas formas de poupar energia elétrica com o objetivo de manter ou aumentar os respetivos níveis de produção.

O objetivo desta dissertação passa por desenvolver uma estufa agrícola “inteligente” que intensifique a produção biológica e que consiga responder automaticamente à variação de parâmetros ambientais externos e internos da estufa, cujos recursos energéticos, nomeadamente os recursos elétricos, são gerados e aplicados de uma forma autossustentável. Isto é, criar um sistema integrado na estrutura da estufa, para a produção elétrica e biológica, para que se correspondam entre si, com o objetivo de aumentar a produção biológica na estufa agrícola (EA) recorrendo a menos recursos. Na análise dos problemas (contradições) e na conceção do sistema em estudo, recorreu-se à Teoria da Resolução Inventiva de Problemas (TRIZ), devido às suas potencialidades no auxílio da criação de sistemas inovadores. A metodologia TRIZ aplica-se em qualquer questão que envolva criatividade. A resolução de problemas constitui um processo de aplicação de conhecimentos adquiridos no que concerne a situações novas (Navas, 2013a). Tem por objetivo auxiliar a elaboração de projetos onde a simples aplicação de “boas práticas” de engenharia ou gestão não produz resultados satisfatórios. É uma ciência internacional de criatividade que se baseia no estudo dos padrões de problemas e soluções, e não na criatividade espontânea e intuitiva de indivíduos ou grupos (Ramos, 2015). A ferramenta principal utilizada,

desta metodologia, foi a Análise Substância-Campo, uma ferramenta da TRIZ essencial para detetar e solucionar problemas para a conceção desta ideia.

1.2 – Estrutura da dissertação

O desenvolvimento da dissertação estabelece-se por 5 capítulos representativos do modelo TRIZ e da criação inventiva de uma estufa “inteligente” e energeticamente sustentável através do mesmo sistema.

1. Introdução,
2. Teoria de Resolução Inventiva (TRIZ),
3. Análise da problemática de estufas agrícolas,
4. Propostas de melhoria,
5. Conclusões.

No Capítulo 1. Introdução, apresentam-se os objetivos do trabalho desenvolvido e a sua organização.

No Capítulo 2. Introdução à Teoria da Resolução Inventiva de Problemas (TRIZ), refere-se à história da TRIZ, os seus parâmetros essenciais, as grandes vantagens que pode trazer e as suas principais ferramentas.

No Capítulo 3. Análise da problemática de estufas agrícolas, faz-se a identificação dos problemas e fragilidades que as estufas apresentam nos dias de hoje, a nível estrutural, funcional, financeiro e classificam-se os tipos de estufas existentes no mercado.

No Capítulo 4. Propostas de melhoria. Apresenta-se sob a forma de soluções possíveis geradas pela ferramenta TRIZ. Da configuração de um sistema de produção elétrico à identificação de componentes essenciais necessários e à funcionalidade da estufa “inteligente”.

No Capítulo 5. Conclusões. Apresentam-se as conclusões e sugerem-se propostas para trabalhos futuros, ou seja, formas de consolidar a desenvolver a ideia presente nesta dissertação.

CAPÍTULO 2 – TEORIA DA RESOLUÇÃO INVENTIVA DE PROBLEMAS

Evolução é provavelmente a palavra que reflete melhor o conceito do universo histórico em que vivemos. Organizações nascem, criam-se, desenvolvem-se, dando continuidade a um processo que, à exceção da morte, se torna todo ele de evolução. Uma constante da vida que também se verifica nas sociedades e nas suas respectivas organizações. O sucesso e a continuidade de uma organização ou sociedade depende em muito da sua capacidade de se inovar e de se reinventar. O surgimento de novos paradigmas socioeconômicos e tecnológicos vão exigindo que essa evolução se faça sobre modelos eficientes e práticos. Com isto, é oportuno dizer que a geração de ideias e a geração de invenções sistemáticas são cruciais para a sustentabilidade e funcionalidade saudável das suas organizações. A resolução de problemas constitui um processo fundamental para a evolução e desenvolvimento de uma organização.

2.1 – Introdução à metodologia TRIZ

O decorrer dessas evoluções, os chamados processos evolutivos, esbatem-se contra a necessidade constante de resolver problemas. São desenvolvidas técnicas de resolução de problemas específicos em todos os campos da atividade humana, com destaque especial para as ciências (técnicas de resolução de problemas de matemática, programação, engenharia, medicina, etc.) (Navas, 2014a).

A Teoria da Resolução Criativa de Problemas, mais conhecida pelo seu acrônimo russo TRIZ, é uma metodologia especialmente apropriada para a resolução de problemas novos nas áreas da ciência e da engenharia (Navas, 2014a). A TRIZ, que foi desenvolvida por Genrich Altshuller tem por objetivo auxiliar a elaboração de projetos, nos quais a simples aplicação de “boas práticas” de engenharia ou gestão não produzem resultados assinaláveis, pois tais problemas contêm contradições técnicas fundamentais (Altshuller, 1999).

Pela metodologia TRIZ, a definição de um campo de atividades estabelece a probabilidade do respetivo sucesso. A transferência de ideias entre os indivíduos e os seus princípios, englobando-os como processos de gestão, permite uma série de interações imprevisíveis (Jamali & Hashmi, 2010). Estas interações podem levar à obtenção de várias contradições imprevisíveis e, como consequência, ao "caos". A base das contradições geradas no processo de inovação e invenção são sempre um problema técnico e são exatamente estes problemas técnicos que a metodologia TRIZ ajuda a resolver (Navas, 2014).

O método TRIZ foi criado nos anos 40 na antiga União Soviética. Mas por razões políticas não se divulgaram as suas técnicas nem se deu a conhecer o método ao resto do mundo (Navas, 2014).

Hoje em dia, é uma ferramenta indispensável na criação de ideias e resolução de problemas por grande parte das organizações mundiais, sendo um potenciador ótimo de soluções novas. A metodologia de resolução de problemas técnicos específicos através da TRIZ é ilustrada pela Figura 2.1.

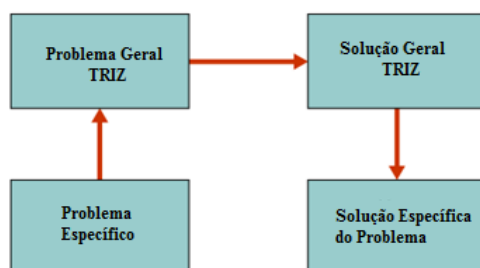


Figura 2.1 - Fluxograma de resolução de problemas (adaptado de Navas, 2013b).

Esta técnica utilizada para a criação de soluções inovadoras não se relaciona com a criatividade espontânea que normalmente associamos à palavra “invenção”, que se relacionam com o senso intuitivo, mas sim num procedimento técnico que segue uma metodologia específica, baseada no estudo de padrões de problemas (Navas, 2014a). Tais problemas contêm normalmente contradições técnicas fundamentais, isto é, a melhoria de um atributo do sistema leva à degradação de outros. Tradicionalmente, as contradições técnicas são resolvidas por via de compromisso, enquanto o TRIZ visa eliminar tal compromisso (Altshuller, 1999). O fundador desta metodologia, Genrich Altshuller, examinou mais de um milhão e meio de patentes e descobriu que utilizando apenas alguns princípios de invenção se conseguia resolver a maior parte dos problemas, mesmo estando eles em campos totalmente diferentes (Rantanen, 2010). Depois de sistematizar as soluções encontradas, dividiu-as em cinco níveis, indicadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Cinco níveis inventivos de Altshuller (adaptado de Navas, 2013b)

Nível	Descrição do Nível	Representatividade das soluções analisadas
Nível 1	Soluções de rotina utilizando métodos bem conhecidos na respectiva área da especialidade	30 %
Nível 2	Pequenas correções em sistemas existentes recorrendo a métodos conhecidos na indústria	45%
Nível 3	Melhorias importantes que resolvem contradições em sistemas típicos de um dado ramo da indústria	20%
Nível 4	Soluções baseadas na aplicação de novos princípios científicos	4%
Nível 5	Soluções inovadoras baseadas em descobertas científicas não anteriormente exploradas	1%

Os níveis foram criados, tendo como referência estudos empíricos de padrões que possibilitem identificar e caracterizar os tipos de soluções encontrados.

2.2 – Características e conceitos fundamentais da TRIZ

Segundo Savransky, a TRIZ pode ser: caracterizada como uma metodologia sistemática, orientada ao ser humano e baseada em conhecimentos e focada na resolução de problemas técnicos. Podendo esta definição ser explicada em quatro partes (Savransky, 2000):

- Conhecimento – TRIZ é baseada em conhecimentos.
 - i. As suas heurísticas de resolução de problemas foram baseadas num número significativo de patentes analisadas em vários campos da engenharia;
 - ii. Faz uso dos conhecimentos das ciências abstratas e concretas;
 - iii. Utiliza conhecimentos referentes ao sistema, processos e técnicas para solucionar problemas específicos.
- Orientada ao ser humano – As heurísticas da TRIZ foram concebidas para uso humano e não computacional, sendo eficaz na resolução de problemas concetuais onde é necessário um espectro de conhecimento mais abstrato na procura de soluções técnicas específicas.
- Sistemática – TRIZ é uma metodologia sistemática.
 - i. Contém métodos estruturados que orientam uma resolução protocolar;
 - ii. Orienta-se através de um sistema de grupos de processo: situação problemática; solução e o processo de solução.
- Solução inventiva de problemas – O propósito da metodologia TRIZ é trazer mais criatividade no que concerne à resolução de problemas. É necessário ir ao fundamento, de uma maneira inovadora e utilizando o pensamento de forma criativa.

2.2.1 – Idealidade

A idealidade no método TRIZ advém da evolução dos sistemas técnicos que se desenvolveram ao longo do tempo, concentrando o aumento das funções úteis e da diminuição das funções inúteis, tanto como as funções prejudiciais, como as neutras. O desenvolvimento de todos os sistemas que visa o incremento de idealidade através da fiabilidade crescente, simplicidade e eficácia com menores custos em menor espaço e menor gasto de energia (Navas, 2014).

A idealidade de um sistema pode ser descrita pela expressão matemática (Goldberg, 2004):

$$Idealidade = \frac{\Sigma Funções Benéficas}{\Sigma Funções Prejudiciais}$$

Vejamos o exemplo de idealidade do telemóvel pela Figura 2.2. Num passado ainda recente, a capacidade de armazenamento dos telemóveis era bastante limitada, tanto quanto o nível tecnológico dos seus componentes, que eram de tamanho considerável. Era impossível ter um telemóvel prático que correspondesse ao próprio conceito de mobilidade e funcionalidade. O tamanho era um problema grave e as funcionalidades limitadas. Inovou-se na tecnologia dos materiais e na disposição dos seus componentes, o que tornou o telemóvel mais compacto. As antenas dos dispositivos móveis desapareceram e o componente relativo à captação de rede não só se tornou mais pequeno como mais eficiente. O espaço deixou de ser um problema relativamente aos ganhos que se poderiam obter com componentes que, entretanto, se desenvolveram. A evolução dos dispositivos de processamento, dos dispositivos de memória e da definição gráfica do telemóvel foram preponderantes no aumento das funcionalidades. Houve um ganho bastante concreto no domínio das funções benéficas e uma perda mínima no domínio das funções prejudiciais. A idealidade tornou o telemóvel mais prático e eficaz.



Figura 2.2 - Evolução da idealização nos dispositivos móveis (Tecnundo, 2015).

2.2.2 – Contradição

Todos os problemas contêm, por definição, contradições (Altshuller, 2002). Uma contradição ocorre quando ao tentar melhorar uma característica ou um parâmetro de um sistema, prejudica-se com isso uma outra característica ou parâmetro. Existem dois tipos de contradições: as contradições técnicas e as contradições físicas.

Contradição Técnica: Ocorre quando se tenta melhorar uma determinada propriedade ou função do sistema e isso leva à deterioração de outras funções (Altshuller, 2002). Exemplo: Para aumentar a velocidade do avião, é colocado um motor mais potente (melhoramento), porém, a solução leva ao aumento do peso do avião (efeito negativo).

Contradição Física: Ocorre quando duas propriedades opostas são exigidas pelo mesmo sistema técnico (Altshuller, 2002). Exemplo: O trem de aterragem é um elemento necessário no avião para efetuar decolagem e aterragem, mas é um elemento que deve ser recolhido quando o avião está no ar, pois aumenta a força de arrasto.

2.2.3 – Padrões de evolução

Durante o estudo das patentes, Altshuller observou que os sistemas e processos técnicos têm algumas semelhanças no seu desenvolvimento. Identificaram-se estas semelhanças, classificando-as em oito categorias a que se chamou de Padrões de Evolução. Os padrões de evolução podem ser utilizados para resolver problemas complexos, prever a evolução dos sistemas e criar ou melhorar as ferramentas usadas para resolver problemas inventivos (Navas, 2014). Existem oito padrões de evolução, a designar (Navas, 2014):

1. Ciclo de vida – refere-se à evolução de um sistema técnico ao longo do tempo,
2. Dinamização – refere-se à transformação de um sistema técnico rígido em flexível,
3. Ciclo de Multiplicação – refere-se à adição de elementos num sistema técnico,
4. Transição do nível macro para micro – refere-se à transformação de tamanho de um sistema técnico de maior para menor,
5. Sincronização – refere-se à sincronização de vários sistemas técnicos ou de parâmetros,
6. Aumento ou diminuição da escala – refere-se ao aumento ou diminuição de escala de objetos ou fenómenos,
7. Desenvolvimento de elementos,
8. Diminuição da intervenção humana (automatização) – refere-se ao desenvolvimento de sistemas técnicos capazes de atuarem por si, libertando as pessoas para o trabalho intelectual.

2.3 – Principais ferramentas e técnicas TRIZ

Para o desenvolvimento da estufa agrícola “inteligente” e autossustentável, recorreu-se a duas ferramentas da metodologia TRIZ:

- Matriz das contradições
- A Análise “Substância – Campo” (*Sufield Analysis*),

2.3.1 – Matriz das contradições

A Matriz de Contradições é a ferramenta mais usada da metodologia TRIZ. É baseada em 39 parâmetros de engenharia, indicados na Tabela 2.2, e 40 princípios inventivos indicados na Tabela 2.3.

Tabela 2.2 - Parâmetros de Engenharia segundo o TRIZ (Altshuller, 2002).

1	Peso (objeto móvel)	21	Potência
2	Peso (objeto imóvel)	22	Perda de energia
3	Comprimento (objeto móvel)	23	Perda de massa
4	Comprimento (objeto imóvel)	24	Perda de informação
5	Área (objeto móvel)	25	Perda de tempo
6	Área (objeto imóvel)	26	Quantidade de matéria
7	Volume (objeto móvel)	27	Fiabilidade
8	Volume (objeto imóvel)	28	Precisão de medição
9	Velocidade	29	Precisão de fabrico
10	Força	30	Fatores prejudiciais que atuam sobre o objeto
11	Tensão, Pressão	31	Efeitos colaterais prejudiciais
12	Forma	32	Manufaturabilidade
13	Estabilidade do objeto	33	Conveniência de uso
14	Resistência	34	Manutenção
15	Durabilidade (objeto móvel)	35	Adaptabilidade
16	Durabilidade (objeto imóvel)	36	Complexidade do dispositivo
17	Temperatura	37	Complexidade no controlo
18	Clareza	38	Nível de automação
19	Energia dispensada (objeto móvel)	39	Produtividade
20	Energia dispensada (objeto imóvel)		

Tabela 2.3 - Princípios de invenção do TRIZ (Altshuller, 2002).

1	Segmentação	21	Corrida apressada
2	Extração	22	Conversão de prejuízo em proveito
3	Qualidade local	23	Reação
4	Assimetria	24	Medição
5	Combinação	25	Auto-serviço
6	Universalidade	26	Cópia
7	Nidificação	27	Objeto económico com vida curta (descartável)
8	Contrapeso	28	Substituição do sistema mecânico
9	Contra-acção prévia	29	Utilização de sistemas pneumáticos ou hidráulicos
10	Ação prévia	30	Membranas flexíveis ou películas finas
11	Amortecimento prévio	31	Utilização de materiais porosos
12	Equipotencialidade	32	Mudança de cor
13	Inversão	33	Homogeneidade
14	Esfericidade	34	Rejeição e recuperação de componentes
15	Dinamismo	35	Transformação do estado físico ou químico
16	Ação parcial ou excessiva	36	Mudança de fase
17	Transição para uma nova dimensão	37	Expansão térmica
18	Vibrações mecânicas	38	Utilização de oxidantes fortes
19	Ação periódica	39	Ambiente inerte
20	Continuidade de uma ação útil	40	Materiais Compostos

A Matriz de Contradições cruza parâmetros técnicos que são melhorados e piorados e é analisada da seguinte forma (Altshuller, 1999):

1. Identificar nas linhas os parâmetros técnicos a serem melhorados;
2. Identificar nas colunas os parâmetros técnicos prejudicados com a melhoria dos outros;
3. No cruzamento das linhas com as colunas encontram-se os princípios inventivos indicados para a resolução da contradição.

2.3.2 – Análise Substância - Campo

A Análise Substância - Campo é um conceito básico usado para identificar os problemas relacionados com um sistema técnico. É uma ferramenta útil tanto na identificação de problemas de um sistema técnico como também é essencial na procura de soluções inovadoras para os problemas identificados no problema respetivo (Navas, 2014). Esta ferramenta permite modelar um sistema através de uma abordagem gráfica simples, identificar problemas e disponibilizar soluções padronizadas para a melhoria do sistema em estudo (Navas, 2014b). Considerada uma das ferramentas mais úteis na metodologia TRIZ, a Análise Substância - Campo sustenta que um sistema técnico, criado para desempenhar uma dada função, pode ser representado por um triângulo cujos vértices representam “substâncias” (objetos, componentes, etc.) e “campos” (ações ou interações) (Fey, 1997). Uma “substância” pode ser um objeto, um material, uma ferramenta, um componente, uma pessoa ou um ambiente (Fey, 1997). Já um “campo” é a interação que faz com que uma “substância” atue sobre outra. Um “campo” que atua sobre as substâncias pode ser mecânico, térmico, químico, elétrico ou magnético (Fey, 1997). No triângulo de um sistema “substância - campo”, duas substâncias e um campo são os elementos necessários e suficientes para definir um sistema técnico funcional, como representado na Figura 2.3.

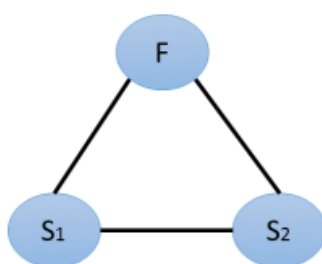


Figura 2.3 - Sistema completo sem problemas (Fey, 1997).

As etapas de construção de um modelo Substância - Campo, estão representadas na Figura 2.4:

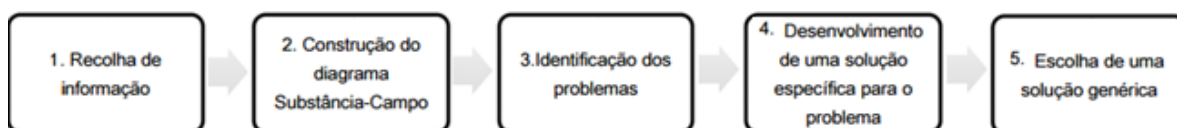







Figura 2.4 - Diferentes etapas para a construção de um modelo funcional (Adaptado de Altshuller, 1999).

Para construir os diagramas Substâncias - Campo, utiliza-se uma notificação específica para representar as relações existentes entre as substâncias em análise, que mudará consoante o desenvolvimento do sistema, como ilustra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Notação Utilizada nos Modelos de Substância - Campo (adaptado de Savransky, 2000).

Símbolos	Significado
	Conexão
	Ação ou efeito desejado
	Ação ou efeito ineficiente
	Ação ou efeito prejudicial
	Operador de solução

A construção de um modelo Substância - Campo pode ser centrada nos elementos mais importantes do sistema e a identificação do problema pode ser distinguida em três situações problemáticas num modelo de aplicação Substância - Campo (Terninko et al, 2007):

1. **Sistema incompleto** - Não ocorre o efeito desejado. Para esta situação, deve-se adicionar o elemento em falta (campo F) para obter-se um sistema completo. A situação problemática 1 é representada pela Figura 2.5.



Figura 2.5 – Situação problemática 1: sistema incompleto (Navas, 2014).

2. **Sistema indesejado ou prejudicial** - Este modelo apresenta a situação em que todos os três elementos se encontram nos respetivos lugares, mas a interação entre as substâncias S1 e S2 é prejudicial ou indesejada. Consequentemente o campo F também é prejudicial. A situação problemática 2 é representada na Figura 2.6.

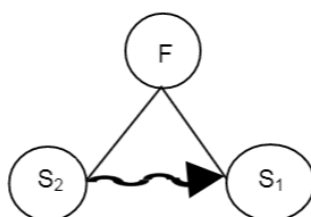


Figura 2.6 – Situação problemática 2: sistema com efeito indesejado ou prejudicial (Navas, 2014).

- 3. Sistema insuficiente ou ineficiente** - Este modelo apresenta a situação em que todos os três elementos se encontram nos respectivos lugares, mas a interação entre as substâncias S1 e S2 é insuficiente ou ineficiente. A situação problemática 3 está representada na Figura 2.7.

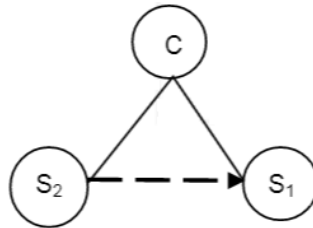


Figura 2.7 – Situação problemática 3: sistema com efeito insuficiente ou ineficiente (Navas, 2014).

A Análise Substância - Campo propõe 7 soluções gerais principais, que poderão ser agrupadas em 5 classes (Gadd, 2011). Alguns investigadores da TRIZ atualmente utilizam 76 soluções gerais que se baseiam nas 7 soluções gerais (Navas, 2013a):

Solução Geral 1 - A solução geral 1 completa um modelo Substância - Campo que se encontre incompleto. Um campo encontra-se em falta e deverá ser acrescentado ao sistema para o tornar completo. Ilustrado na Figura 2.8, está representado a solução geral 1 para a situação problemática 1.



Figura 2.8 - Solução geral 1 para a situação problemática 1 (Navas, 2014).

Solução Geral 2 - Modificar a substância S2 de modo a eliminar/reduzir impacto negativo para produzir/melhorar o impacto positivo. Representado na Figura 2.9, temos a solução geral 2 para a situação problemática 2.



Figura 2.9 - Solução geral 2 para a situação problemática 2 (Navas, 2014).

Solução Geral 3 - Modificar a substância S1, para eliminar/reduzir o impacto negativo para produzir/melhorar o impacto positivo. Representado na Figura 2.10, temos a solução geral 3 para a situação problemática 2.

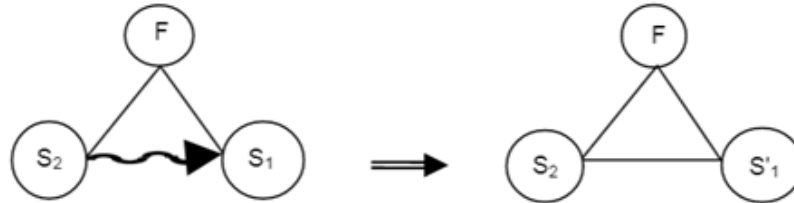


Figura 2.10 - Solução geral 3 para a situação problemática 2 (Navas, 2014).

Solução Geral 4 - Modificar o campo F de modo a eliminar/reduzir o impacto negativo para produzir/melhorar o impacto positivo. Representado na Figura 2.11, temos a solução geral 4 para a situação problemática 2.



Figura 2.11 - Solução geral 4 para a situação problemática 2 (Navas, 2014).

Solução Geral 5 - Eliminar, neutralizar ou isolar o impacto negativo utilizando um campo F_x que interaja com o sistema. Representado na Figura 2.12, temos a solução geral 5 para a situação problemática 2.



Figura 2.12 - Solução geral 5 para a situação problemática 2 (Navas, 2014).

Solução Geral 6 - Introdução de um novo campo positivo. É adicionado um campo F_x^+ para funcionar em conjunto com o campo F , a fim de aumentar o efeito útil. Representado na Figura 2.13, temos a solução geral 6 para a situação problemática 2.

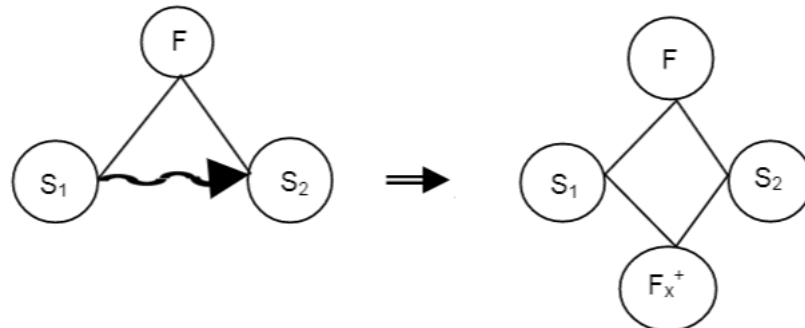


Figura 2.13 - Solução geral 6 para a situação problemática 2 (Navas, 2014).

Solução Geral 7 - Expandir um modelo Substância - Campo existente para um sistema em cadeia. Representado na Figura 2.14, temos a solução geral 7 para a situação problemática 2.

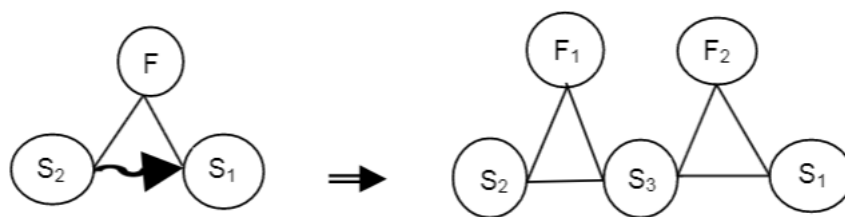


Figura 2.14 - Solução geral 7 para a situação problemática 2 (Navas, 2014).

As soluções gerais utilizadas para a situação problemática 2 podem ser usadas para a situação problemática 3 (Navas, 2014).

2.3.3 – Algoritmo de Resolução Inventiva de Problemas

O ARIZ é uma sigla russa que significa “Algoritmo de Resolução Inventiva de Problemas”. É uma ferramenta analítica importante para a solução de problemas, explicada na Figura 2.15.

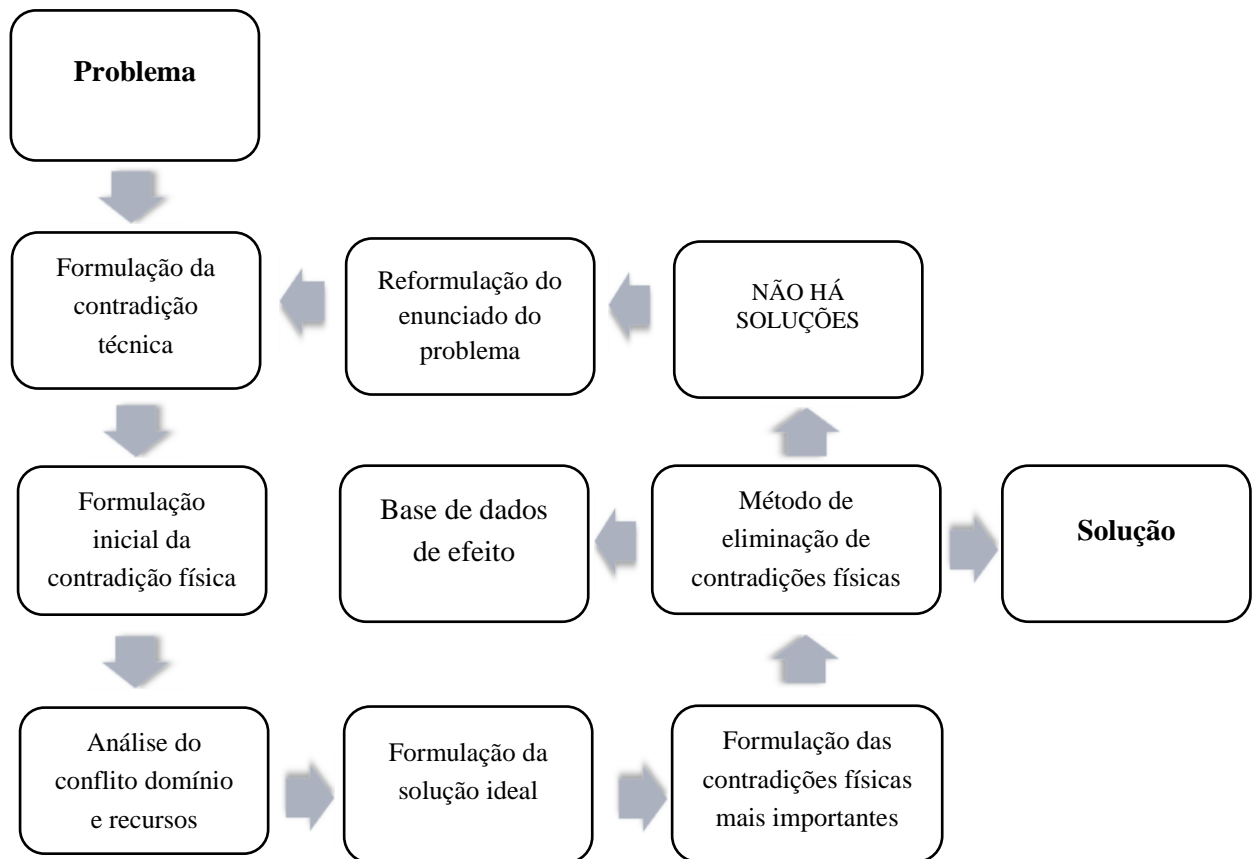


Figura 2.15 - Ferramenta ARIZ (adaptado de Navas, 2013).

A versão do ARIZ, apresentada no esquema em cima, contém apenas os passos mais importantes (Navas, 2014d). Atualmente, a versão mais utilizada do algoritmo é a versão ARIZ-85c que contém 85 etapas, sendo que a versão mais recente tem cerca de 100 etapas diferentes (Navas, 2014d). O algoritmo ARIZ inicia-se pela análise do enunciado do problema, formulam-se de seguida as contradições técnicas, e procura-se na tabela de contradições, quais os princípios inventivos a utilizar (Gadd, 2011). Procede-se então à análise de conflitos, sendo que os elementos em conflito incluem a peça, que é o elemento que necessita de ser alterado, e a ferramenta que é responsável por essa alteração (Gadd, 2011). É recomendável a construção de modelos gráficos por forma a facilitar a identificação do problema/conflito. O passo seguinte é a formulação do problema em termos do Resultado Final Ideal (RFI). Uma solução só é considerada RFI nas seguintes condições (Navas, 2014d):

- Se consegue obter uma nova característica benéfica;
- Se elimina uma característica prejudicial sem degradar as outras ou sem criar novas que também sejam prejudiciais.

O RFI é em seguida transformado em contradição física mais pormenorizada. A eliminação da contradição física baseia-se num dos três princípios (Navas, 2014d):

- Separação temporal das propriedades antagónicas;

- Separação espacial das propriedades antagónicas;
- Separação das propriedades antagónicas por redistribuição das mesmas no interior do sistema.

O processo ARIZ deve ser reformulado se não resolver o problema (Gadd, 2011).

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DA PROBLEMÁTICA DE ESTUFAS AGRÍCOLAS

A progressiva descoberta científica, impulsionada pela exigência global de maior e melhor produção alimentar, fez evoluir e desenvolver novos métodos de produção agrícola. Todavia, a ciência não domina a natureza, nomeadamente o clima, que é um dos mais importantes agentes que influencia, quantitativa e qualitativamente todas as produções, mas faz obrigar o engenho humano a desenvolver técnicas que propiciam níveis satisfatórios para os resultados pretendidos, sendo o objetivo deste: condicionar favoravelmente o clima de uma cultura para o resultado pretendido. As estufas são estruturas altamente sofisticadas, que protegem as culturas contra o vento, chuva, neve e granizo, assim como doenças ou temperaturas extremas. Estas estruturas têm como objetivo promover as condições ideais, para o crescimento das plantas e culturas ao longo dos anos, procurando otimizar a transmissão de radiação solar, humidade, temperatura e níveis de CO₂ em condições de ambiente controlado, para melhorar a produção intensiva de diversas culturas e cujas dimensões permitem o trabalho de pessoas no seu interior (Elsner et al., 2000).

3.1– Estufas agrícolas para produção industrial

As estufas são estruturas cobertas com um material transparente, onde as culturas são crescidas sob condições de ambiente controlado. O cultivo em estufas, bem como outros modos de cultivo em ambiente controlado, é, de certa forma, implementado com o objetivo de proporcionar microclimas favoráveis. Favorece a produção de culturas para o ano inteiro ou para a maior parte do ano, dependendo das condições meteorológicas necessárias para a execução da mesma ou do investimento que o produtor tenciona disponibilizar para garantir objetivamente essas mesmas condições. Estufas para a produção controlada do ambiente de crescimento da cultura estão associadas com a produção fora de época de plantas ornamentais e de alimentos de alto valor em áreas de clima frio, onde a produção ao ar livre não é possível ou não consegue ser de todo garantida. Nestes casos, investimentos de grandes dimensões são inevitáveis. Nos países nórdicos, nomeadamente na Holanda, que domina o mercado de produtos biológicos produzidos em estufas, com mais de 4.000 empresas que hoje representa 7,2 mil milhões de euros na economia holandesa (Ponce et al., 2013), apresentavam no ano 2000, um custo de produção médio de 80 €/m² (Rantanen, 2010). Já na América, mais propriamente na cidade de Alberta, Canadá, o custo de produção, em 2010, rondou os 80 – 130 €/m² (Ponce et al., 2013). Já nos países mais a sul, associados a climas mais quentes, a técnica utilizada para controlar o ambiente de cultivo é mais económica, uma vez que os gastos energéticos utilizados para o aquecimento do ambiente são consideravelmente baixos, sendo estes apenas necessários em períodos de Inverno. No entanto, o automatismo responsável pela ventilação e a refrigeração do ambiente interno destas estufas, requer, neste tipo de clima, uma atenção especial. Os fatores condicionantes existentes na

produção destas estruturas variam entre a sua localização geográfica e os parâmetros biológicos da planta a cultivar. O parâmetro primário das estufas a controlar é a temperatura, onde a maior parte das EA's, funcionam apenas como retentor de calor para superar as condições de frio. No entanto, o controle do ambiente também pode incluir o arrefecimento para mitigar temperaturas excessivas através de simples janelas. Os parâmetros secundários existentes em estufas também podem incluir o controlo da luz incidente, o controlo da adição de luz suplementar, o controlo de níveis de dióxido de carbono, o controlo de humidade relativa, da água, dos nutrientes de plantas e também do controle de pragas. É, portanto, necessário, distinguir e classificar o nível de tecnologia associado a cada estufa para os diferentes níveis de controlo.

3.1.1 – Classificação das EA's

O projeto envolvente de uma EA deve ser baseado em princípios científicos sólidos que facilitem o ambiente controlado para o crescimento da planta (Ponce et al., 2013). Os sistemas de produção na agricultura de precisão são utilizados em todo o mundo a fim de estabelecer condições ideais às espécies cultivadas na agricultura num dado momento ou num dado lugar, para uma determinada qualidade que não é garantida ao ar livre. O controlo do ambiente exige muito mais investimento de capital por unidade de área do que a tradicional agricultura de campo, correspondendo a uma prática agrícola mais intensiva para justificar os custos de investimento (Ponce et al., 2013). Isto é, quanto maior for o custo da estufa, maior será a necessidade de a dotar de sistemas de controlo, pois assim se garante, com maior eficiência, o sucesso do cultivo e consequentemente o retorno desse investimento. Hoje em dia, podemos classificar uma estufa em função do tipo de investimento que é feito, descrito de seguida.

i. Estufa de baixo investimento/low-tech

As estruturas de estufas podem ser construídas com diferentes materiais e estas podem ter no mercado diferentes formas. Como ilustrado na Figura 3.1, são preferencialmente construídas a partir de materiais baratos e facilmente disponíveis. Madeira, bambu e aço são os mais adequados para a construção de estufas em filme plástico. A película ultravioleta (UV) é utilizada como material de revestimento. Ao contrário de estufas convencionais, não tem nenhum dispositivo de controlo específico para regular parâmetros ambientais dentro da estufa. Técnicas simples são, contudo, adaptadas para aumentar ou diminuir a temperatura e humidade. Mesmo a intensidade da luz pode ser reduzida pela incorporação de materiais de sombreamento como redes. A temperatura pode ser reduzida durante o Verão, abrindo somente as paredes laterais. Essa estrutura é



Figura 3.1 - Estufa básica (Nova Agrícola, 2013).

usada como abrigo da chuva para o cultivo de culturas. O custo destas estufas variam entre 15-29 €/m² (Ponce et al., 2013).

ii. Estufa de investimento médio/*mid-tech*

Representam o tipo de estufas que usam vidro ou plástico rígido na sua cobertura e alumínio ou aço na sua estrutura. São construídas para um tipo de produção que dá preferência a um controlo automático ou semiautomático pois prefere ir além do investimento mínimo. Esta preferência está muito associada a produtores que preferem garantir certas cotas de produção reduzindo a influência de fatores externos na cultura como baixas temperaturas, humidades relativas fora dos parâmetros adequados e vento. A Figura 3.2 demonstra um exemplo de estufas de médio custo.



Figura 3.2 – Estufa dotada de sistemas semiautomáticos (Serres, 2016).

A cobertura está ligada à estrutura através de parafusos e a estrutura inteira está firmemente fixada ao solo para suportar as forças geradas pelo vento. Ventiladores com termostato para controlar a temperatura são do tipo de dispositivos mais usados neste tipo de estrutura para as estufas. Dispositivos de remoção de calor também são colocados para manter uma humidade favorável no interior da estufa. Estes sistemas semiautomáticos exigem muita atenção por parte do produtor no controlar gastos energéticos e asseguram a produção para fins comerciais, apesar de ser difícil manter a qualidade de cultura uniforme durante todo o período de cultivo. Associa-se a uma duração de produção de cultivo para o ano inteiro. A Figura 3.3 é um exemplo de uma estufa que controla e aplica luz suplementar na falta de luz natural. São estufas que requerem um investimento contínuo ao longo dos anos e que estão estruturalmente capacitadas para incluir equipamentos e dispositivos de nível tecnológico considerável. O custo associado a estas estufas variam entre 30-90 €/m² (Ponce et al., 2013).



Figura 3.3 - Estufa dotada de automatismo de irrigação (Dutchgreenhouses, 2017).

Dependendo das ambições comerciais de cada produtor, a generalidade prefere usar este tipo de estufas pelo tipo de automatismo comportável para sistemas de irrigação, ventilação, sombreamento e monitorização de culturas.

iii. Estufas de Alto Custo/ *Hi-Tech*

São as estufas mais sofisticadas existentes no mercado. Para superar as dificuldades das estufas *mid-tech*, estas estufas são controladas inteiramente por dispositivos de controlo de ambiente que funcionam automaticamente. Estas estufas consolidam soluções inovativas a nível do controlo ambiental interno, energia, luz, substrato e gestão de água. São utilizadas para produção intensiva e têm ao seu dispor todos os dispositivos computadorizados. Associa-se a uma produção de cultivo para o ano inteiro. Algumas dessas estufas já têm incluídos sistemas de telas transportadores para movimentar e processar produtos biológicos cultivados para fins comerciais, como podemos ver na Figura 3.4. O custo associado a estas estufas inicia-se a partir dos 150 €/m² (Ponce et al., 2013).



Figura 3.4 - Estufa dotada de sistema automáticos (Hortidaily, 2017)

3.1.2 – Critérios de dimensionamento segundo a norma EN 13031-1

Os danos resultantes dos estragos nas estruturas, revestimentos e nas culturas levam a avultados investimentos por parte do estado português e da União Europeia, tendo neste último ano, sido suportados exclusivamente pelos produtores agrícolas. Os produtores são exímios conhecedores da atividade agrícola, contudo o mesmo não se reflete no conhecimento estrutural das estufas. Verificou-se que um dos principais critérios na escolha das estufas era o preço, o que se manifestava diretamente no tipo de robustez da estrutura. A norma europeia EN13031-1 que regula o processo construtivo das estufas comerciais é desconhecida da maioria dos intervenientes, sendo um instrumento fundamental para a diminuição de danos estruturais devidas a ações externas (Muñoz et al., 2013). As estruturas das estufas podem dividir-se em duas classes, A e B, dependendo crucialmente da disposição dos elementos da própria estrutura (EN 13031-1, 2002). As estufas deste tipo devem ser concebidas considerando o Estado Limite de Utilização (ELS), bem como o Estado Limite Último (ELU).

O estado limite considerado para cada carregamento é determinado com base na classificação da estrutura da estufa. É este o critério de dimensionamento que serve para verificar que qualquer estado limite não é ultrapassado (EN 13031-1, 2002):

- **Classe A:** são as estruturas em que o sistema de revestimento não tolera os deslocamentos da estrutura, submetidas às ações de projeto. As estufas deste tipo devem ser concebidas considerando o estado limite de utilização (ELS), bem como o estado limite último (ELU).
- **Classe B:** as estufas em que o sistema de revestimento tolera os deslocamentos da estrutura resultantes das ações definidas em projeto. Para estas classes de estufas consideram-se apenas o ELU.

As condições de validade dos métodos de cálculo são definidas por um conjunto de critérios de durabilidade, tolerâncias, manutenção e reparação. Esta norma recomenda 5, 10 e 15 anos mínimos dependendo da classe da estufa (Muñoz et al., 2013). De acordo com o tipo de estufa e a vida útil da estrutura a norma considera um total de 5 classes de estufas, mas as mais importantes e mais utilizadas são as classes A e B, como apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Tempo de vida mínimo para um projeto de estufa segundo a norma EN 13031-1 (Adaptado de Muñoz et al., 2013).

Classificação	Tempo de vida mínimo		
	15 Anos	10 Anos	5 Anos
Classe A	A15	A10	-
Classe B	B15	B10	B5

A utilização da norma EN 13031-1 permite realizar estruturas mais resistentes aos fenómenos atmosféricos, tendo em conta os efeitos do vento sobre os filmes de plástico na cobertura da estufa. Consequentemente, os produtores beneficiariam de melhores análises de risco, por parte das seguradoras, o que seria favorável para todos os agentes envolvidos nas estufas.

3.1.3 – Posicionamento e orientação de estufas

No geral, existem dois critérios a ter em conta na orientação da estrutura de uma EA (Kumar et al., 2009).

- A quantidade de luz que penetra na estufa,
- Prevalência dos ventos que deve ser minimizada na estrutura.

Vários autores defendem uma orientação da estufa, construída de este para oeste, expondo a parede lateral ao seu sul. Com isto, pretende-se que o cultivo fora de época, nomeadamente no Inverno, consiga captar a luz solar que nesta altura é mínima, uma vez que o sol se faz sentir num ângulo mais baixo em relação ao plano horizontal da superfície da Terra se compararmos com a época do Verão. Na Figura 3.5, poderemos ver as diferentes alturas do sol no período de Inverno e no período de Verão, no hemisfério norte, podendo observar a razão pela qual convém construir a estufa no sentido este-oeste para culturas em *off-season*.

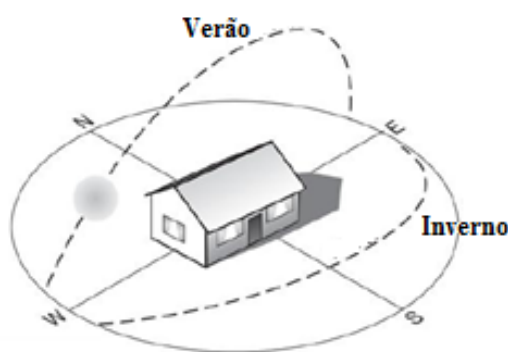


Figura 3.5 - Percurso solar no Verão e no Inverno no hemisfério norte (Adaptado de Ponce et al., 2013).

A orientação da estufa e a inclinação do telhado da estufa são dois fatores essenciais que influenciam a quantidade de luz, sendo o primeiro aquele que tem maior influência (Waaijenberg, 2004). Outro critério que deve ser considerado na orientação da estufa é a prevalência da incidência do vento na localização da estufa em estudo (Muñoz et al., 2013). Através do estudo da prevalência do vento, poderá definir-se a orientação da estufa com o objetivo de favorecer a circulação de ar no seu interior (Muñoz et al., 2013). A ventilação natural traz vantagens no que concerne ao custo do investimento contra os gastos energéticos da ventilação automática (Kumar et al., 2003). No entanto, em estufas revestidas com plástico, o vento é o principal responsável pelos danos nas estruturas, exigindo bastante na conceção do projeto das mesmas. O vento, em resultado da sua natureza, gera pressões variadas na cobertura das estufas e tensões correspondentes na estrutura e nas suas respetivas fundações (Muñoz et al., 2013). Este fator natural pode causar danos sérios no caso da velocidade do vento ser demasiado elevada (Critten & Bailey, 2002). São estes acontecimentos que sucedem com mais frequência e geram a grande parte dos prejuízos aos produtores em estufas, como ilustra a Figura 3.6 depois de uma intempérie na Póvoa de Varzim.



Figura 3.6 - Estufa destruída pelo vento (Hortinet, 2013).

Outros danos podem tornar-se igualmente críticos com ventos menos fortes. Por exemplo, se uma das aberturas na lateral da estufa for deixada aberta durante o período de vento. Esse acontecimento gera uma pressão positiva no interior da estufa que por sua vez já sofre uma determinada pressão na sua superfície exterior. Estas duas combinações de forças, quando ocorrem são geralmente maiores do que a força potencial do vento levando a sérios danos na estrutura ou ao seu total colapso (Walker et al., 1973). Na Holanda, onde existem as maiores culturas em estufas da Europa, os ventos são o fator mais importante a ter em conta, porque as tempestades são as maiores causas de danos nas estufas (Elsner et al., 2000). Os danos em estufas, instalações e culturas só entre Janeiro e Fevereiro de 1990, devido a duas tempestades que surgiram, causaram um total de despesas de 200 milhões de florins (cerca de 98 milhões de euros, valores correspondentes a 1990) (Elsner et al., 2000).

3.1.4 – Tipos de estruturas

Geralmente as estufas podem ser analisadas tendo em conta as suas dimensões. Uma estufa com volume muito elevado resulta numa resposta lenta do ambiente interior da EA às condições ambientais externas (Kumar et al., 2009). No entanto, quanto mais altas são as estufas, menores são as flutuações no seu microclima interior, o que resulta num aumento de consumos de energia sempre que é necessário realizar mudanças dos parâmetros interiores. As estufas altas são também mais exigentes em termos de estabilidade estrutural, ao serem submetidas a maior carga resultante da força do vento. Os diferentes tipos de EA estão disponíveis no mercado com diferentes tipos de estrutura para os diferentes tipos de zonas climáticas. Variam entre aquelas que possibilitam maior nível de insulação, as que cobrem uma maior zona de cultivo, as que apresentam um menor custo de produção, ou EA's que apresentam uma maior robustez, a fim de desenvolver uma maior proteção contra intempéries (Ponce et al., 2013). Os diferentes tipos de estrutura são identificados na Figura 3.7.

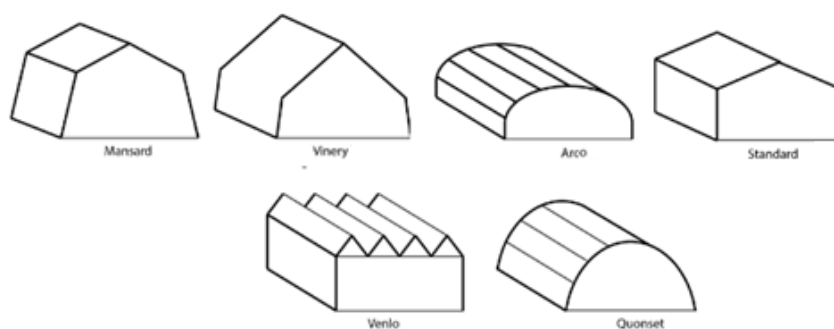


Figura 3.7 - Tipos de estruturas de uma EA (adaptado de Ponce et al., 2013).

Os tipos de estrutura mais utilizados são *Standard*, *Venlo* e *Arco*. As características de cada uma, bem como as suas vantagens e desvantagens, são aspetos fundamentais que serão seguidamente descritos (Ponce et al., 2013).

Estrutura em Arco:

É construída toda em metal e é caracterizada pela sua forma em túnel. É popular pois é uma estufa capaz de controlar microclimas e é de rápida e fácil construção. É projetada para uma altura entre os 3,5 metros e os 5 metros. A largura varia entre os 6 metros e 9 metros.

Vantagens:

- Possibilita uma ótima transmissão de luz solar,
- Boa resistência aos ventos,
- Construção pouco complexa (devido aos seus elementos pré-fabricados).

Desvantagens:

- Volume propício a maiores flutuações de temperatura,
- Pouca capacidade de ventilação.

Estrutura de cobertura inclinada (Standard):

É o tipo de estrutura similar ao de uma casa, com a sua cobertura a apresentar um grau de inclinação a variar entre os 15° e 35°. Variação de largura entre os 6 metros e os 12 metros. Altura entre 5 metros e 7 metros. A sua configuração é favorável a um bom sistema de ventilação e à possibilidade de adicionar acessórios de controlo.

Vantagens:

- Fácil ventilação lateral,
- Uso de materiais económicos na sua construção,
- Facilidade de drenagem da água para um reservatório,
- Possibilidade de usar materiais de cobertura flexíveis ou rígidos,
- Estrutura robusta com maior resistência a intempéries.

Desvantagens:

- Ventilação dificultada na zona alta do telhado,
- Tem mais elementos, pelo que dificulta a entrada de luz relativamente a outros tipos de estrutura,
- Menos espaço para plantar que a estrutura em arco.

Estrutura Venlo:

É a estufa de vidro mais usada a nível mundial. Este tipo de estufas encontra-se normalizada para diferentes tamanhos, o que permite que a sua construção e manutenção se tornem mais económicas (Elsner et al., 2000). Para além disso, por serem estruturas modulares existe uma grande variedade de equipamentos que permite que se adaptem a este tipo de estufas (Bouzo, 2009). A estrutura é geralmente metálica, em aço ou em alumínio, e o material de revestimento é o vidro.

Vantagens:

- Controlo elevado sobre as condições ambientais,
- Facilidade de drenagem da água para um reservatório,
- Estrutura robusta com maior resistência a intempéries,
- Boa capacidade de ventilação.

Desvantagens:

- O material de revestimento usado afeta a transmitância de luz,
- São estufas financeiramente dispendiosas.

3.2 – Disponibilidade energética

São as estufas *high-tech* que representam no seu conjunto os maiores gastos energéticos. Esse gasto é justificado pelo fornecimento de energia a vários instrumentos elétricos de controlo. E servem, pois está claro, para simular ambientes quando as condições naturais não são as ideais. Níveis de luz, de temperatura e outros tantos parâmetros são controlados e organizados em grande medida pelo produtor. Isto resulta numa produção mais segura mas menos rentabilizada, pois requer entradas substanciais de recursos externos, especialmente de energia elétrica. Sendo essa cota parte, responsável por 10- 15% dos custos operacionais (Sanford, 2011).

Um dos maiores desafios na produção agrícola precisa, incluem, para além da procura de recursos hídricos, solucionar formas de otimizar e rentabilizar a sua necessidade energética. Com isto, o uso responsável da energia é um elemento importante de sustentabilidade. O incentivo ao uso das energias renováveis na produção biológica em EA, a ser considerado, pode proporcionar uma boa oportunidade de primeira instância a esses desafios. No contexto da produção em estufa, é fulcral o uso de energia no que concerne a sistemas de luz, de aquecimento e de sistemas que contemplem motores elétricos.

Dos sistemas de instrumentação mais comum que se usam nas EA, como sistemas de luz artificial, sistemas de ventilação, sistema de irrigação, sistema de sombreamento e humidificação, dos mais variados medidores e atuadores, todos esses instrumentos são alimentados a energia elétrica (Kumar et al., 2003). A Tabela 3.2 apresenta valores da potência de energia combinada de instrumentos que podemos encontrar numa EA de nível tecnológico médio/alto de 150 m².

Tabela 3.2 - Potência de uma EA (Kumar et al., 2009).

Sistema	Atuador	Potência Elétrica (W)	Total (W)
Ventilação Passiva	3 Motores	370	1100
Ventilação Ativa	2 Motores	370	740
Sombreamento	1 Motor	370	370
Aquecimento	1 Aquecedor	2.000	2.000
Humidificação	1 Bomba	370	370
Irrigação	1 Bomba	370	370
		TOTAL	4.960

Na Tabela 3.3, podemos ver representadas as potências combinadas de energia necessárias para as diferentes dimensões da EA. Verificamos uma necessidade de energia quando queremos aumentar o espaço de cultivo. A esse aumento, está associado um crescimento exponencial nos gastos de eletricidade.

Tabela 3.3 - Potência elétrica em função da dimensão de uma EA (Kumar et al., 2003).

Dimensão da EA (m²)	Potência elétrica combinada (kW)
500	15
500 – 2000	24
2000 – 3000	36
3000 – 4000	48
4000 – 8000	96
8000 – 12000	145

Os custos energéticos são o terceiro tipo de custo operacional financeiramente mais pesado para o produtor (Sanford, 2011). Representaram em média 5,9% em 2003 quando o nível tecnológico em estufas começava a expandir-se, para que em 2010, já atingiam uma média de 10%, das vendas totais dos produtores agrícolas (U.S. Department of Agriculture, 2011), estima-se um aumento significativo dessa parcela, uma vez que se recorre cada vez mais a automatismos na agricultura em geral.

3.3 – Análise de mercado

A produção de horticultura em estufas para fins comerciais surgiu no norte da Europa nas primeiras décadas do século passado. Com o uso de estufas de vidro aquecidas equipadas com sistemas de cultivo sofisticados, os produtores pretendiam ultrapassar os problemas do cultivo de

espécies sensíveis ao frio, durante a maior parte do ano. Após a chegada do plástico nos anos 60, o cultivo em estufas começou a deslocar-se para regiões com Inverno ameno, tais como a Bacia Mediterrânea (Pardossi et al., 2004). A evolução das técnicas de cultivo protegido fizeram com que o uso de estufas agrícolas se expandisse para países asiáticos (Pardossi et al., 2004) e para regiões onde a água representasse um recurso escasso para a prática da agricultura tradicional, uma vez que as estufas permitem o uso da água de uma forma mais racional e eficiente (Critten & Bailey, 2002). Na Figura 3.8, estão representadas as localizações dos diferentes tipos de clima para a agricultura.

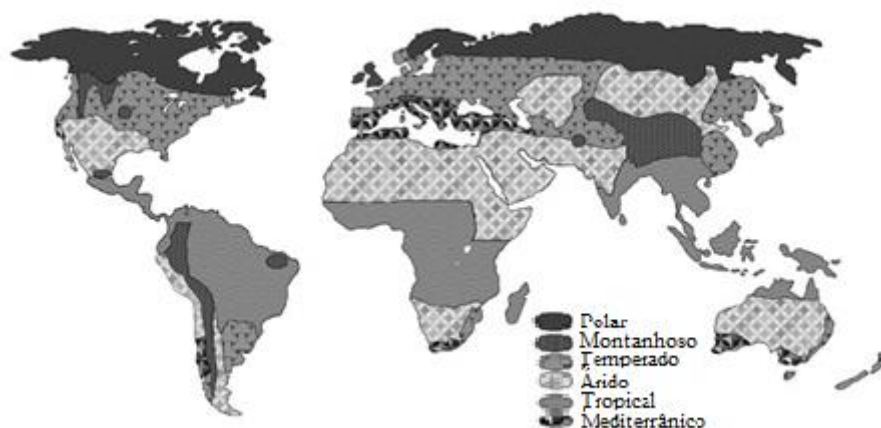


Figura 3.8 - Tipo de climas na agricultura (adaptado de Pardossi et al., 2004).

E na Tabela 3.4 estão estimadas as áreas de terreno utilizadas para produção biológica em estufas para as respetivas regiões do mundo.

Tabela 3.4 – Estimativa da área de utilização de estufas nas diferentes regiões do mundo (Pardossi et al., 2004).

Região	Estimativa da área de utilização de estufas (ha)
Ásia	443.000
Bacia do mediterrâneo	105.000
América	19.600
Europa (excluindo os países da Bacia do mediterrâneo)	42.500
África + Médio Oriente	17.000
Total	627.000

Dado o constante dinamismo e alterações no sector da agricultura protegida, torna-se complicado encontrar dados estatísticos fiáveis a nível mundial (Pardossi et al., 2004). Contudo, a agricultura protegida supera os 627.000 hectares, com um crescimento anual de 20%, desde 1980. Atualmente, a área coberta para produção no continente Asiático corresponde a cerca de 70% da área coberta de estufas no mundo, concentradas principalmente na China (200.000 ha), Japão (60.000 ha) e Coreia do Sul (37.000 ha) (Costa et al., 2010). A partilhar o mesmo tipo de clima temperado, os mesmos autores referem os países nórdicos da Europa, com uma área de produção igual a 42.500 hectares. Já na bacia do mediterrâneo, a produção protegida localiza-se, essencialmente, junto à costa devido à sua característica de temperatura amena. O mesmo acontece com os países da costa do norte de África, colocando a bacia mediterrânea, no segundo lugar mundial ao nível da área de ocupação de estufas. Espanha tem sido o país europeu a apresentar a maior utilização de estufas agrícolas, destacando-se a região de Almeria que engloba 50% dos 66.000 há do país (Hernández & Parra, 2006), na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Estufas agrícolas de Almeria, Espanha (Athus-Bertrand, 2016).

Portugal não é exceção, a área de horticultura tem vindo a aumentar. Em 2007 a área de horticultura protegida era de 2.196 hectares, ao passo que em 2011 o valor estimado de agricultura protegida era de 3.000 hectares (Costa et al., 2010) representando 10% da área total de produção hortícola e cerca de 18% da produção agrícola generalizada (Instituto Nacional de Estatística, 2012). Indicado na Tabela 3.5, temos o número de explorações agrícolas protegidas em Portugal no ano de 2012.

Tabela 3.5 - Explorações e área base com culturas hortícolas por região (INE, 2012).

Regiões	Culturas hortícolas		Culturas hortícolas extensivas ao ar livre		Culturas hortícolas intensivas ao ar livre		Culturas hortícolas em estufa	
	Expl.(nº)	Área (ha)	Expl.(nº)	Área (ha)	Expl.(nº)	Área (ha)	Expl.(nº)	Área (ha)
PORTUGAL	25 165	31 763	18 072	21 116	13 563	9 470	3 295	1 177
CONTINENTE	21 725	31 070	15 316	20 741	11 990	9 167	3 175	1 162
EDM	3 101	1 720	2 154	717	1 855	827	1 125	176
TM	936	271	683	120	700	136	99	14
BL	3 314	1 738	2 198	815	2 519	844	473	78
BI	699	159	549	74	478	82	31	3
RO	7 812	20 672	4 952	13 701	4 537	6 587	895	385
ALE	2 394	4 841	1 703	4 350	1 338	469	73	22
ALG	3 469	1 670	3 076	963	562	222	478	484
AÇORES	344	208	260	125	218	76	72	7
MADEIRA	3 097	484	2 496	250	1 356	227	49	7

Em Portugal, o sector da horticultura protegida teve início na zona costeira do Algarve, tendo posteriormente sido expandido para o norte do país, nomeadamente pela orla litoral, à imagem da maioria dos países do sul da Europa (Costa et al., 2010). O crescimento junto ao litoral beneficiou das temperaturas máximas mais baixas e ausência de geadas, assim como da proximidade aos maiores centros urbanos (Costa et al., 2010). No norte de Portugal na região de Entre o Douro e Minho, a utilização de estufas na horticultura e floricultura segue o crescimento nacional tendo-se verificado uma área de estufas de 229 ha em 1997, 386 ha em 2007 e foi estimada uma área de 600 ha em 2013 (Costa et al., 2010). Uma previsão que foi dobrada, como observado na tabela 3.5, para 1.177 ha só em 2012.

3.3 – Identificação de problemas e oportunidades de melhoria em estufas agrícolas

Das informações obtidas através de produtores e construtores de estufas, podemos enunciar os problemas e as características associados aos diferentes tipos de clima.

Tipos de problemas na EA em Clima Temperado:

- Temperaturas baixas em períodos de Inverno,
- Cargas significativas de vento, neve e granizo,
- Luz insuficiente de Inverno,
- Verões ocasionalmente quentes.

Características necessárias da EA:

- Estabilidade suficiente contra o vento e neve,
- Um eficiente sistema de aquecimento,
- Cobertura de alta transparência,
- Eficiente isolamento contra perdas de calor,
- Suficiente sombreamento e ventilação no Verão.

Tipos de problemas na EA em Clima Mediterrâneo:

- Durante o ano, entre um a três meses, as temperaturas são abaixo das ótimas, sendo necessário aquecimento,
- Altas temperaturas diurnas na Primavera e Verão,
- Alta humidade do ar durante a noite,
- Baixa radiação global durante a noite,
- Ventos significativos e, por vezes, neve e granizo inesperados,
- Pouca disponibilidade da água.

Características necessárias da EA:

- Aquecimento para os meses de Inverno,
- Sistemas eficientes de ventilação e sombreamento,
- Estabilidade em zona de ventos fortes,
- Disponibilidade de sistemas de irrigação eficientes.

A conceção do projeto de uma estufa define não só o comportamento estrutural, mas também fatores climáticos internos tais como a temperatura, humidade e a transmitância de luz. Desta forma, o projeto para o desenvolvimento de estufas deve ter, com extrema importância, todos os parâmetros ambientais do respetivo local para cada mês, nomeadamente a temperatura média, máxima e mínima, humidade relativa, a irradiância global e a prevalência do vento.

Nesta conceção, uma estufa deve conseguir dar resposta às condições de limite ambientais que sejam adequadas à produção da cultura em questão. Isto é, conseguir condicionar eficazmente o ambiente interno às flutuações de temperatura no interior e controlar a intensidade da luz solar. Por exemplo, em estufa, é mais fácil um país nórdico produzir produtos biológicos para parâmetros de temperatura ambiental mais baixos que produtos biológicos cultivados em climas favoravelmente quentes. Da mesma maneira, é mais fácil, em países equatoriais, cultivarem plantas que necessitem de mais tempo para a fotossíntese do que em países cujo a irradiância solar é mais baixa, como em países escandinavos.

Face a estes problemas, é necessário, avaliar os condicionantes geográficos e biológicos para a variedade de culturas que se pretendem produzir de uma forma eficaz e sustentável, mesmo que sejam regiões atípicas para essa produção. A EA deve responder de uma forma elástica à variação de parâmetros ambientais, tornando o ambiente interno mais independente de fatores externos, para uniformização da qualidade das culturas, aumento a produção e que seja economicamente viável. A EA deve garantir uma produção de plantas uniforme ao longo do ano e de alta qualidade a uma relação de custo-operacional/lucro adequada. Ou seja, em regiões com baixa radiação solar, prolongar a fotossíntese com recurso a luz artificial é um requisito fundamental para a realização deste projeto, uma vez que não se conseguem ter mais horas de sol que aquilo que natureza o permite.

Por outro lado, em locais onde existam elevados níveis de radiação solar, são necessários equipamentos que façam reduzir a intensidade de radiação solar sobre as plantas, com consequências prejudiciais à saúde das mesmas (Elsner et al., 2000). Bem como um sistema de ventilação mais complexo. Todos estes problemas são resolvidos com recurso a sistemas automáticos, mas sistemas automáticos requerem energia para sua execução. Quanto mais independente e autónoma for a EA de fatores externos, mais sistemas automáticos serão necessários. Mais sistemas automáticos significa mais precisão no crescimento da cultura, refletindo-se numa maior qualidade na produção biológica.

Esse exemplo é demonstrado no norte da Europa, onde as estufas são de vidro e com elevado grau de automatização e controlo. Nesta região, o cultivo protegido, dotado de sistemas de controlo semiautomáticos, que embora seja bastante dispendioso com os custos energéticos, têm como objetivo, otimizar a produção e dar qualidade aos cultivos para o ano inteiro. Por sua vez, nos

países do sul da Europa, as estufas são de baixo custo, e maioritariamente com revestimento de plástico. Nestas regiões, as EA's são usadas para antecipar o período de crescimento na Primavera e prolongar o cultivo no Outono. O que proporciona o controlo climático mínimo e permite à planta o seu crescimento, sendo este tipo de cultivo suficientemente rentável (Muñoz et al., 2013). Nesta situação, a preocupação é a rentabilidade da produção em função do investimento mínimo, uma vez que a estrutura utilizada, não contribui diretamente para a qualidade do produto em si, apenas o garante de mais tempo de produção. Repetido anteriormente e concluindo com Giaomelli, se a produção de plantas de alta qualidade possuir sistemas ambientais controlados e uma relação de custo-benefício adequada, então o projeto da estrutura também deverá ser adaptado à cultura em causa (Giacomelli et al., 1993). Se o projeto da estrutura é adaptado à cultura em causa, então o nível de automação também pode ser adaptado à cultura em causa com o objetivo de melhor relação custo-benefício.

O recurso às energias renováveis têm dado capacidade aos produtores de suprimir os custos operacionais no que concerne aos gastos energéticos. Assim sendo, aumentar a disponibilidade energética pode aumentar o controlo sobre o respetivo cultivo, fazendo assim, aumentar a qualidade sobre o produto a cultivar. Racionalizar essa disponibilidade energética parece ser uma solução na procura de qualidade de produto biológico, ao mesmo tempo que garante sustentabilidade económica ao produtor. Ou seja, produz-se mais ao mesmo tempo que se economiza mais.

CAPÍTULO 4 – PROPOSTA DE MELHORIA

A sofisticação tecnológica e a evolução de técnicas e práticas agrícolas, poderão fazer com que o crescimento de qualquer cultura se faça com maior facilidade e sobretudo com maior eficiência. No capítulo 3, podemos classificar, avaliar e identificar as características mais eficientes que a estrutura de uma EA deve conjugar, como as suas especificações e funcionalidades com vista a favorecer um clima propício no seu interior, a melhorar na proteção de fatores externos e executar com precisão toda a sua produção biológica de uma forma ecológica e eletricamente autossustentável. A eficiência da resposta às variações climáticas e o condicionamento ambiental no seu interior depende intrinsecamente do nível da qualidade exigido pelo produtor agrícola. A segmentação do mercado da agricultura protegida (em estufas) distingue-se não pelo tamanho da área de produção, mas do nível de tecnologia utilizada nessa respetiva produção. Isto porque cada vez mais produtores em estufas tendem a rentabilizar a sua área de produção, procurando reduzir o ciclo de crescimento biológico ao mesmo tempo que procuram qualidade e segurança nos seus investimentos. Diminuir o custo operacional relacionado com essa produção é o fator crucial para desobstruir os custos altos associados a esse aumento de produção. Até porque mais qualidade se tem quanto maior for o nível tecnológico da estufa em causa. Neste capítulo, desenvolver-se-á a estufa “inteligente” e autossustentável através da metodologia TRIZ.

4.1– Definição dos requisitos e das características da estufa autossustentável

A proposta apresentada neste capítulo assenta numa EA “inteligente” que consiga responder tanto ao tipo de clima frio como ao tipo de clima quente. Isto é, que satisfaça o cultivo independentemente das estações do ano em que é cultivado e independente do tipo de clima que lhe é característico. Recorreu-se à ferramenta da metodologia TRIZ, a Análise Substância-Campo, para a deteção de problemas e de possíveis soluções para este caso. Contudo, deve-se, primeiramente, definir um sistema Substância - Campo que permita identificar problemas e desenvolver soluções para o sector da agricultura protegida. Por isso, é necessário identificar-se as substâncias S1 e S2, como as substâncias do modelo utilizado para se desenvolver uma EA “inteligente” e eletricamente autossustentável.

Tendo em conta as desvantagens identificadas no capítulo anterior, é preciso responder às flutuações de parâmetros internos relacionados com variação de parâmetros naturais externos para o decorrer do dia e durante o ano inteiro. A substância S1 é, por isso, a substância deste sistema responsável pela captação de dados externos e de execução de uma resposta positiva no interior da estufa “inteligente”. É, por outras palavras, a substância responsável por avaliar se as condições ambientais do interior da EA estão ou não de acordo com os parâmetros estipulados pelo produtor

para a sua produção biológica, e executar uma ação caso se verifique uma diferença ambiental desses parâmetros. O ambiente interno definido pelo produtor para a produção das suas culturas é a substância S2 deste sistema substância - campo. Na Figura 4.1, o ambiente interno idealizado pelo produtor para a sua produção (S2) é representado pelo círculo envolto aos automatismos (S1) que irão analisar, processar e atuar.

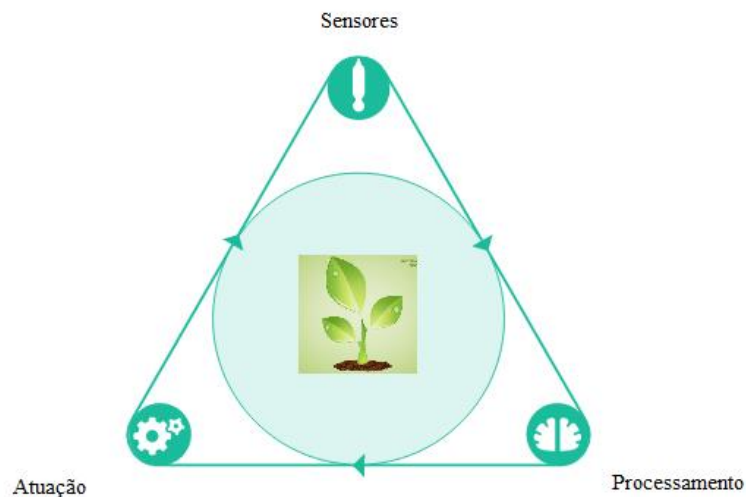


Figura 4.1 - Sensores, processadores e atuadores para um ambiente interno ideal.

Deverá recorrer-se à primeira solução geral para este caso, uma vez que é um sistema que se apresenta primeiramente incompleto. O pretendido para a estufa “inteligente” é que consiga ter uma capacidade de resposta positiva a alterações externas sob diferentes condições. Essa capacidade é monitorizada pelo sistema de controlo ambiental cujo objetivo é o de dotar a estufa “inteligente” de parâmetros de produção precisos. Todavia, essa produção de precisão entra em conflito com a demanda energética exigida pelos sistemas de controlo automáticos. Ou seja, sem energia para alimentar o nível de automatização da estufa não se conseguirá obter a qualidade exigida pelo produtor. Este conflito resolver-se-á através da aplicação de umas das ferramentas da TRIZ, a Análise Substância - Campo. Com esta ferramenta, recorreu-se para este caso, aos princípios de invenção e à matriz de contradições.

Na matriz de contradições, o elemento a ser melhorado é o 29 dos parâmetros de engenharia, “precisão de produção”, e o elemento que é piorado é o parâmetro de engenharia 38, “nível de automatização”. Após a identificação dos parâmetros de engenharia em conflito, através da matriz de contradições, conseguiu-se identificar os princípios de invenção que podem resolver o conflito. São eles, os princípios de invenção 26, 28, 18 e 23, que correspondem respetivamente ao princípio de invenção de “cópia”, “substituição de sistema mecânico”, “vibrações mecânicas” e “reação”. Para ser um sistema completo, o campo F terá de ser o agente responsável pela ligação que potenciará a conexão de S1 a S2. Essa ligação só será possível com a introdução de um campo elétrico, segundo o princípio inventivo número 28, identificado na matriz de contradições, pela substituição de um sistema mecânico por um sistema elétrico.

Portanto, uma fonte de energia elétrica que proporcione energia suficiente aos automatismos instalados, idealizará a sustentabilidade energética que objetivamos para a estufa em estudo. A solução pretendida torna o sistema completo como é representado na Figura 2.3. A definição do campo F como o campo elétrico do sistema deverá ser acompanhado tendo em conta a idealização de autonomia do sistema. Nos dias de hoje, a energia solar é o recurso mais usado, e tecnologicamente mais avançado no sector das renováveis, demonstrando ser uma excelente fonte elétrica para a produção agrícola e para a autonomia financeira do produtor. A aplicação desta tecnologia depende, em muito, da sua localização. Para regiões onde a irradiação é alta, a solução ótima passa pelas instalações fotovoltaicas. Para uma região onde existem grandes fluxos de massas de ar, um sistema eólico é uma solução em vista. Sistemas híbridos (solar + eólica) também podem ser dimensionados para a estufa “inteligente”, mas para este estudo, será apenas considerado o recurso a energia solar. Ou seja, é uma fonte abundante e inesgotável que trás sustentabilidade nos termos da necessidade elétrica dos automatismos e em termos financeiros com vista a diminuir o custo operacional a longo prazo. Outro aspeto positivo no uso das energias renováveis é que os equipamentos de conversão elétrica, para além de apresentarem um baixo custo de manutenção, também apresentam uma vida útil longa (cerca de 15-20 anos).

Na maior parte dos casos, a aplicação fotovoltaica, utilizada na produção agrícola, é dimensionada à parte do projeto para a estrutura da estufa, servindo esta instalação, apenas para suprimir gastos operacionais. No entanto, há uma clara desvantagem na utilização desta tecnologia: a instalação fotovoltaica usará parte do terreno agrícola para a sua alocação. Há uma percentagem considerável do terreno utilizado que não serve a produção agrícola e que exige desobstrução à luz solar. Há certos produtores que não têm condições para a instalação de um sistema fotovoltaico porque as próprias estufas fazem de obstáculo à luz solar. Quando não são árvores ou edifícios adjacentes.

Recorrendo à solução geral 4, onde se pretende melhorar o sistema com recurso à modificação do campo do sistema, o parâmetro de engenharia a ser melhorado, o parâmetro 39, “produtividade”, entra em conflito com o parâmetro 6, “área do objeto”, sendo identificado a “nidificação” como princípio inventivo. Ou seja, exige-se a acoplação do sistema fotovoltaico na estrutura da própria estufa. A EA “inteligente” que se pretende autónoma será, a partir desta configuração, capaz de gerar ela própria energia para a sua produção, com o sistema de geração de eletricidade a fazer parte integral da estrutura da estufa. Sabe-se, no entanto, que incluir tecnologia fotovoltaica na cobertura de uma estufa, prejudicaria, em muito, o crescimento saudável das culturas, pois a opacidade dos módulos fotovoltaicos impediria a passagem de luz necessária à fotossíntese das plantas.

4.2 – Configuração da estufa e dos componentes

O desenvolvimento desta tecnologia fotovoltaica fez surgir no mercado, vidros parcialmente transparentes que deixam passar luz enquanto geram energia. Ora, é exatamente esta tecnologia

de vidros fotovoltaicos que é conveniente incluir na estrutura desta estufa para tornar o sistema completo e assim fazer interagir as substâncias S1 e S2 sem prejuízo para a produção das culturas. A Figura 4.2 retrata a importância da passagem de luz na EA “inteligente”.

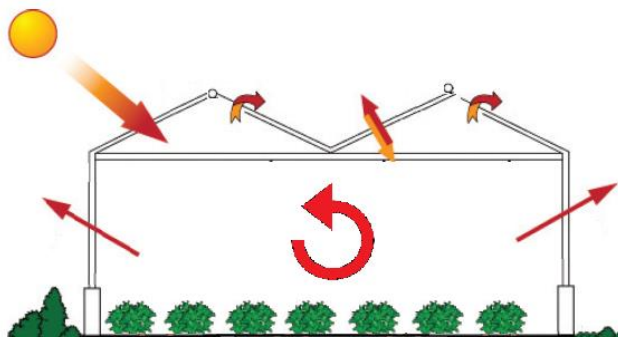


Figura 4.2 - Ilustração da passagem de luminosidade usando vidros fotovoltaicos numa EA.

Na secção 3.1.3 que aborda a orientação das estufas relativamente aos pontos cardeais na rosa-dos-ventos, esta diz, que, se deve dar a lateral para sul pois pretende-se que o cultivo fora de época, nomeadamente no Inverno, consiga captar a luz solar que nesta altura é mínima. Isto é demonstrado na Figura 4.3. Muitos autores defendem a melhor orientação dos fotovoltaicos para sul (Pereira & Oliveira, 2011), para que a exposição solar seja maximizada e assim obter-se mais energia diária.

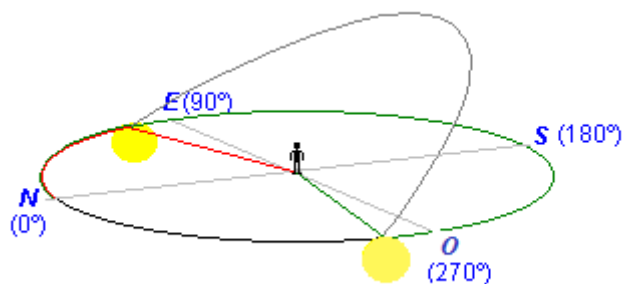


Figura 4.3 - Percurso solar no Inverno (Pereira & Oliveira, 2011).

Para tornar o sistema mais eficiente, é necessário distinguir cada substância com maior especificidade, com o objetivo de identificar-se uma possível contradição, que deverá, posteriormente, ser eliminada de forma a melhorar o campo.

Assim, divide-se S1 em S1.i onde i representa todos fatores e sistemas para a atuação específica. Temos, portanto:

- S 1.1 – Sensores;
- S 1.2 – Processamento;
- S 1.3 – Atuadores.

A subdivisão de S1 surge precisamente para clarificar o tipo de substância em questão e a sua função, nomeadamente, para definir a sua característica física e alocação específica na estufa, com o objetivo de averiguar a existência de contradições.

- **S1.1 – Sensores:**

Os sensores estão na primeira fila de atuação numa EA. Independentemente do tipo de investimento que se faz, qualquer estrutura de controlo de ambiente interno tem incluído este tipo de ferramenta sensorial. Existem desde simples termómetros a instrumentação altamente precisa de parâmetros ambientais. Na substância S1.1, relativamente sensores usados em estufas, podemos diferenciá-los, em outro subconjunto. Temos então:

- i) S1.1.1 – Sensor de câmara infravermelha,
- ii) S1.1.2 – Temperatura do ar, humidade relativa, humidade do solo e luminosidade,
- iii) S1.1.3 – Sensor de rega multiparâmetro: corrente de água, pH, ORP (*Oxidation Reduction Potential*), OD (*Oxygen demand*), TDS (*Total Dissolved Solids*).

Nesta distinção verifica-se que existe um tipo de sensor para uma função específica. Atendendo a este facto, deduz-se que cada sensor possui, portanto, uma característica física diferente e, naturalmente, uma localização específica diferente. Esta informação é relevante justamente porque chama à atenção a uma possível contradição, que, conseqüentemente, se solucionará através do método TRIZ, para melhorar o sistema.

- i) S1.1.1 - Sensor de câmara infravermelha

O controlo por infravermelho tem sido largamente utilizado para avaliar a saúde de culturas extensas. Um sensor ótico avalia as condições de colheita, emitindo luz com comprimentos de onda específicos sobre as folhas da cultura. Neste processo, a luz é refletida de volta ao sensor, medindo a intensidade e os comprimentos de onda respetivos. Os princípios básicos para a deteção ótica são semelhantes às observações visuais. As plantas verdes absorvem a maior parte dos comprimentos de onda de luz visível, em particular, as ondas de luz azul e vermelha e reflete a maior parte das ondas a luz verde. É por esta razão que as folhas das plantas parecem verdes ao olho humano. Pode-se, portanto, através destes instrumentos, analisar parâmetros importantes que traduzam dados cruciais sobre a saúde das culturas, ao captar comprimentos de onda da luz verde provenientes da clorofila nas folhas da planta. Esta reflexão de luz verde pode ser usada para avaliar o estado de azoto da colheita, avaliar o grau ferro de clorose, deficiência de enxofre ou qualquer outra condição que causa redução na cor verde. As plantas absorvem muito menos luz

NIR (*Near-InfraRed*) que a luz vermelha. A cor verde escura nas folhas reflete mais luz NIR e absorve mais luz vermelha do que as folhas verdes claras, ilustrada na Figura 4.4. Esta técnica é usada para desenvolver índices vegetativos e comparar a saúde relativa das culturas. Para fins comerciais, esta técnica de controlo agrícola traz vantagens ao nível da monitorização de todas as estufas usadas na produção biológica. A informação da redução da cor verde nas culturas é automaticamente reportada ao produtor e a identificação de eventuais problemas são instantaneamente diagnosticados. O controlo das culturas é garantido eficazmente pela câmara infravermelha em terrenos agrícolas extensos.

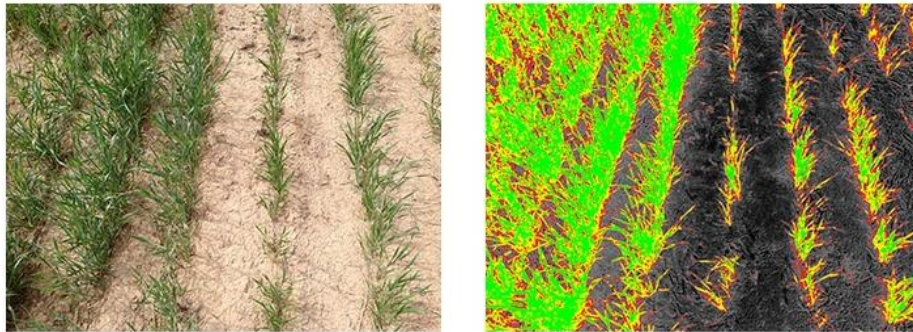


Figura 4.4 - Reflexão de luz visível ao olho humano versus leitura infravermelha (Agribotix, 2014).

Este sensor necessita de estar no teto da estrutura da estufa. Um aspeto importante desta substância que será relevante para a construção do nosso campo, se pretendermos dar autonomia funcional à EA, sem prejudicar outros elementos, nomeadamente as luzes artificiais, que atuarão no mesmo espaço da estufa. A Figura 4.5 ilustra a necessidade de se posicionar a câmara infravermelha num local favorável, a fim de permitir, também, a ação de outra instrumentação.

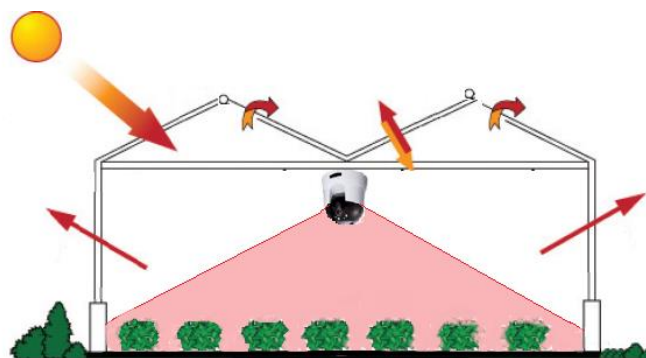


Figura 4.5 - Posicionamento do sensor de IV.

ii) S1.1.2 – Temperatura do ar, humidade relativa, humidade do solo e luminosidade,

Estes serão os sensores mais importantes nesta estrutura de estufa, uma vez que vão conciliar os respetivos dados com os automatismos responsáveis pelo aquecimento, humedificação e ventilação. A análise da temperatura do ar, humidade relativa, humidade do solo e luminosidade

é feita através de um só dispositivo equipado com quatro sensores. Vários instrumentos estão disponibilizados no mercado para este efeito e a maioria destes instrumentos de captação de dados para estes fatores, não prejudica, de forma direta, a funcionalidade de outras substâncias pelo que não se verifica nenhuma contradição no sistema em estudo, como ilustrado na figura 4.6.

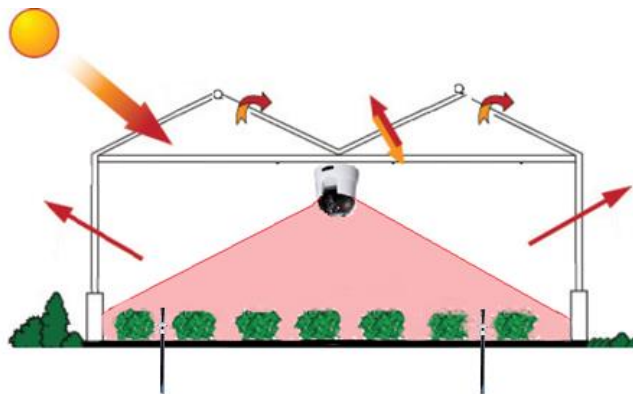


Figura 4.6 - Posicionamento do sensor temperatura, humidade e luz.

iii) S1.1.3 – Sensor de rega multiparámetro: corrente de água, pH, ORP, OD, TDS.

O sensor que controlará a distribuição de água e nutrientes até à planta estará localizado no interior da conduta de água. No geral, a irrigação é feita através de um sistema mais conveniente à cultura, permitindo a utilização de técnicas como micro irrigação (por gotejamento ou por mico aspersão), aspersão (sob pivô central ou convencional), entre outras, menos utilizadas. Desta forma, não se definirá o tipo de técnica de irrigação que se usará na estufa, uma vez que dependerá unicamente do tipo de cultura a produzir. A conclusão que devemos tirar desta pequena análise é que os sensores de rega também não prejudicarão a funcionalidade de outras substâncias.

▪ **S1.2 – Processamento**

A *box* de processamento é o dispositivo onde os dados de entrada serão processados, para obtenção de um determinado resultado. Este processo obedece a um conjunto de ações estabelecidas pelo produtor através de um dispositivo eletrónico. Este dispositivo eletrónico comunica com a *box* de processamento que fará a interação de comandos entre o que se pretende e o que se deve executar. Processa automaticamente a informação recebida pelos sensores, analisa os dados definidos pelo produtor e faz atuar ou não, em correspondência aos parâmetros definidos, os sistemas automáticos de ajuste e controlo ambiental. Na ilustração seguinte, as setas a verde correspondem à informação enviada pelo conjunto de sensores, as setas azuis ilustram o sentido da corrente de água e as setas a cinzento representa a comunicação com os atuadores. Este processo é controlado automaticamente através de uma *box* de processamento que possibilita também a troca de dados em tempo real entre a EA e o produtor.

A Figura 4.7 ilustra todo o processo envolvido no controlo e monitorização da estufa agrícola “inteligente” (EAI).

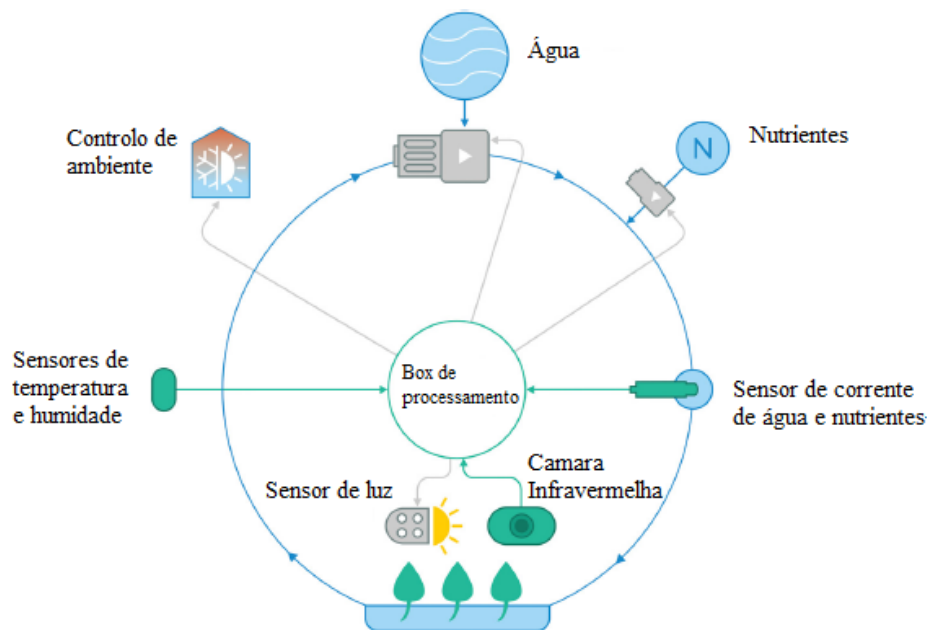


Figura 4.7 - Processamento de dados.

A robotização desta estufa “inteligente” trás vantagens ao nível do controlo preciso para uma área de cultivo de grandes dimensões. A análise automática, recebida instantaneamente e diretamente no dispositivo eletrónico do produtor faz com que o controlo e a ação de um problema pontual estejam a meros segundos de ser identificado e consequentemente solucionado. O conceito de estufa “inteligente” aproxima-se ainda mais ao conceito de agricultura precisa que se pratica nos dias de hoje, garantindo ainda mais precisão e qualidade para a cultura em produção.

▪ **S1.3 - Atuadores**

A reação e capacidade de resposta ao ambiente interno da estufa “inteligente” é da responsabilidade dos atuadores, que aqui desempenham a ação física no que concerne ao ajuste dos parâmetros ambientais no seu interior. Os sistemas automáticos incumbidos para essa função são:

- i. S1.3.1 – Luz artificial,
- ii. S1.3.2 – Aquecimento,
- iii. S1.3.3 – Ventilação,
- iv. S1.3.4 – Irrigação,
- v. S1.3.5 – Sombreamento.

A descrição de todos os sistemas automáticos e a justificação da sua necessidade são descritos nesse seguimento:

i) S1.3.1 - Luz artificial

Quando uma planta é colocada num ambiente de completa escuridão, não se regista qualquer atividade de fotossíntese (Rabinowitch & Govindjee, 1969). Aumentando a intensidade luminosa, a taxa da fotossíntese também aumenta. E aumenta até ao ponto onde todos os pigmentos são excitados pela luz solar, para a realização de fotossíntese (Rabinowitch & Govindjee, 1969). Nesse ponto, chamado de Ponto de Saturação Luminosa (PSL), qualquer adição de luz é dispensável, pois não são acompanhados por elevação na taxa da fotossíntese (Woerden & Bakker, 2000). A equação da fotossíntese ilustrada na equação da Figura 4.8.

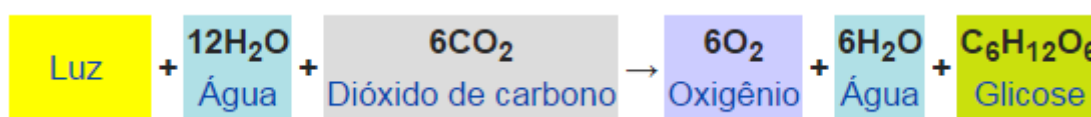


Figura 4.8 - Equação ilustrada da fotossíntese (Bidlack et al., 2003).

Muito se tem feito para minimizar as implicações energéticas no sector da horticultura mantendo o nível de produção e a qualidade das plantas. No entanto, pouco se tem feito para se desenvolver um fornecimento de energia adequado e económico para o nível qualidade de produção exigido. O fornecimento de luz artificial é uma das ferramentas principais da EA em estudo que se pretende desenvolver. E é aplicável se, no geral, a luz do dia natural for insuficiente para o crescimento das plantas. Serve para estender o período de luz em dias de fim de Outono, Inverno e início da Primavera. O *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) é um termo que designa a faixa espectral da radiação solar que ativa o processo de fotossíntese nas plantas. A intensidade, a duração, a direção, a qualidade espectral da radiação que as plantas recebem, são fatores que influenciam sensivelmente o processo de fotossíntese, cujos parâmetros variam de espécie para espécie. A faixa espectral do PAR está representada na Figura 4.9.

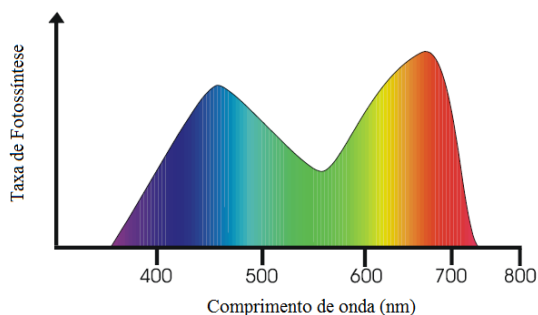


Figura 4.9 - Espectro do comprimento de onda para a fotossíntese (Argus Controls Systems, 2010)

Todavia, a fotossíntese é um processo quântico e as suas reações químicas estão mais dependentes do número de fótons do que na energia contida no próprio fóton. É por essa razão, que os cientistas quantificam o PAR usando o número de fótons contido no espectro de 400-700 nm em função da superfície e em função do tempo. Essa quantificação faz surgir uma nova variável que é usada para medir a densidade da luz instantânea aplicada diretamente na planta: *Photosynthetic Photon Flux Density* (PPFD), cuja unidade é expressa em $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Hall & David, 1999). É possível calcular com exatidão a necessidade de luz adicional que cada cultivo necessitará ou mesmo atingir um ponto ótimo de luz fornecido à planta de um modo constante e prolongado sem qualquer malefício à saúde da mesma. A particularidade desta estufa está intrinsecamente ligada à sua capacidade de controlar e regular a PPFD necessária para uma produção uniforme, precisa e de qualidade.

Este incremento de luz adicional é um componente essencial para crescimento das plantas quando o céu se encontra parcialmente ou totalmente nublado e para estender os dias curtos de Inverno com poucas horas de luz solar num processo de fotossíntese artificialmente prolongado. Para a produção intensiva de produtos biológicos em estufas, a luz artificial é usada igualmente para ser complementada com a luz natural, dando apenas continuidade à exposição luminosa. A adição de luz artificial na indústria agrícola vai ajustar a quantidade de luz necessária à duração de um dia de condições perfeitas. E já que existe uma incidência maior de fótons por metro quadrado, resultando da incidência da luz suplementar, vai haver mais superfície disponível por parte das plantas para receber essa quantidade de luz adicional, o que resulta na possibilidade de mais plantas poderem ser semeadas na mesma quantidade de área. O que traduz em maior produção. Numa experiência realizada na Universidade de Reading, o professor Paul Hadley aplicou diferentes intensidades de luz suplementar ao crisântemo. Como é visível, na Figura 4.10, a experiência com duração de 45 semanas efetuada na aplicação de $9,6 \text{ W/m}^2$ PAR durante os meses de Novembro e Dezembro (meses onde existem níveis baixos de luz natural), resultou num significativo ganho de 54% do peso relativamente à planta da mesma espécie onde foram aplicadas $4,9 \text{ W/m}^2$ PAR (Hadley, 2002). Por outro lado, o mesmo estudo informa que aplicação dos mesmos parâmetros de luz suplementar nos meses de Março e Maio ao crisântemo resultou em ganhos de peso de apenas 12%. Hadley, advém, todavia, que a aplicação de luz artificial suplementar deve apenas ser utilizada quando dessa utilização resultar benefícios comerciais.



Figura 4.10 - Influência da intensidade de luz no crescimento do crisântemo (Hadley, 2002).

Para o propósito comercial, usar luz artificial é mais benéfico em zonas climáticas onde a exposição solar não passa de 4,5 horas de sol de média diária. Segundo os dados disponíveis no *site* meteorológico de referência, www.weatheronline.pt, foram registadas as horas de sol médias diárias em Lisboa, para os anos de 2012 e 2013, indicada na Figura 4.11.

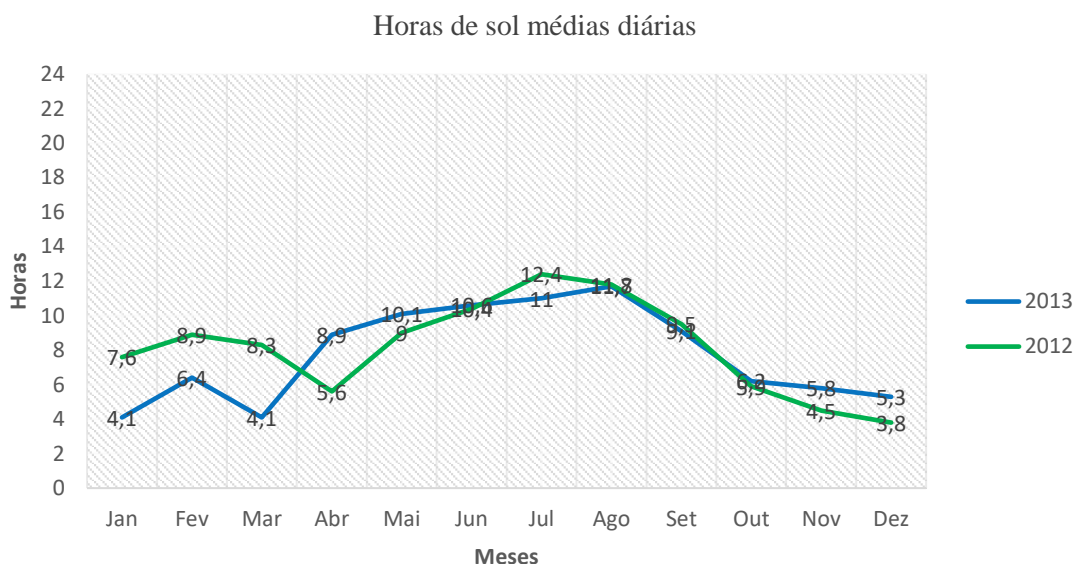


Figura 4.11 - Horas de sol diárias para 2012 e 2013 em Lisboa.

Para os períodos homólogos de 2012 e 2013, houve uma pequena variação nas horas médias solar diárias. O que significa que não se tem sempre a mesma intensidade nem quantidade de luz solar para os mesmos dias dos diferentes anos. Dias nebulosos ou sombreamentos de outro tipo, fazem variar a quantidade de luz que incide na cultura e isso tem efeito no crescimento da mesma (Taiz & Zeiger, 2002). Outra indicação proveniente do gráfico mostra a necessidade de compensar a falta de horas de sol diárias com luz artificial nos meses onde, dependendo da planta em questão (fotoperíodo), poderá haver escassez de luz solar para a realização da fotossíntese. Por outro lado, há plantas que apresentam menor necessidade de luz solar. São naturalmente produzidas em períodos de Inverno. Para além de criar um sistema de luz artificial para complementar a luz solar, põe-se a hipótese de criar um sistema que controle e prolongue a duração da escuridão sobre culturas para espécies de plantas cujo fotoperíodo é de pouca duração. Será dada mais atenção a este sistema de sombreamento mais para a frente do estudo da EA.

Na horticultura, há interesse em medir três tipos de propriedades:

- Irradiância – Potência radiante incidente por unidade de superfície,
- Qualidade Espectral – Composição do comprimento de onda e intensidade,
- Duração – Duração da incidência de luz diária.

A combinação destas três características determinará a quantidade de energia instantânea e cumulativa que deverá estar disponível para a fotossíntese. A necessidade de iluminação artificial e a sua respetiva qualidade são determinadas pelos seguintes fatores:

- Requisitos de luz de cada espécie a plantar,
- Duração do fotoperíodo natural,
- A média de horas de luz solar,
- O ângulo de altura solar e intensidade,
- Quantidade de sombreamento da estufa.

O fotoperíodo natural ou fotoperiodismo é um termo usado em botânica e descreve os efeitos e adaptações de plantas ao fotoperíodo, associado à duração de luz e falta de luz (escuridão) recebida pela planta durante um dia (Taiz & Zeiger, 2002) e consiste na duração do período de luz recebido por uma planta num determinado lugar, dependendo da latitude e da estação do ano. A floração das plantas depende da duração dos dias e das noites. Quando se tem um dia longo seguido de uma noite curta, as plantas de dia longo florescem depois de um tempo, já as de dia curto não. Ou seja, são plantas que florescem no Verão. Quando se tem um dia curto seguido de uma noite longa, é a vez das plantas de dia curto florescerem, ou seja, são plantas que florescem no Inverno. Uma planta que requer um longo período de escuridão é denominada de planta de "dia curto" (ou longa noite). As plantas de dias curtos formam flores apenas quando o comprimento do dia é inferior a cerca de 8 a 12 horas (Taiz & Zeiger, 2002). Muitas das plantas que florescem na Primavera e Outono são plantas de dia curto. Se estes são expostos a mais de 8 horas de luz por dia, a formação da flor não ocorre ou ocorre deficientemente. Já as outras plantas exigem apenas uma noite curta para florescer. Estas são chamadas de plantas de "dia longo" pois florescem apenas quando recebem mais de 12 horas de luz (Taiz & Zeiger, 2002). A explicação é acompanhada pela Figura 4.12.

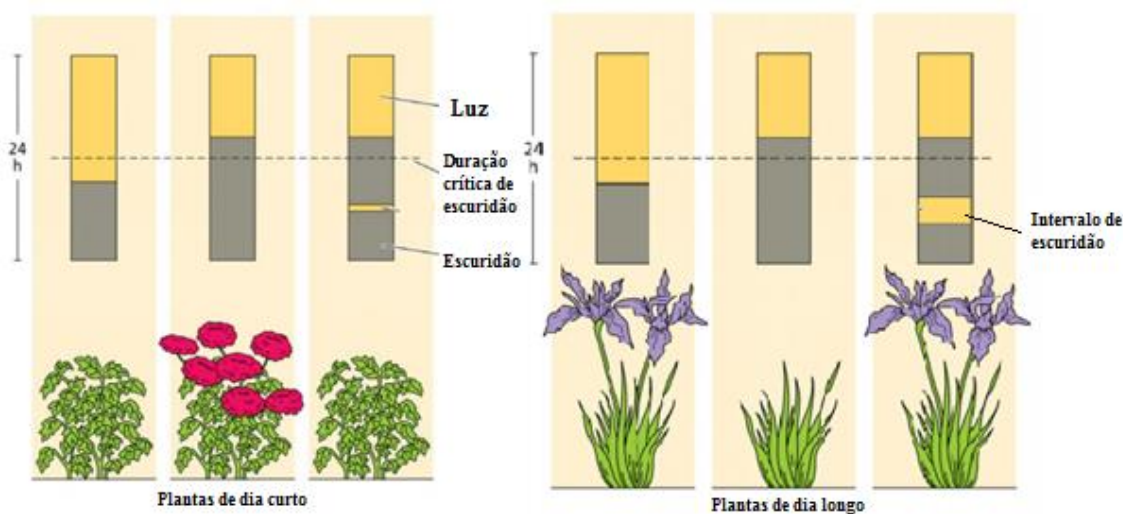


Figura 4.12 - Diferenças entre as plantas de dia curto e de dia longo (Taiz & Zeiger, 2002).

Ajustar e nivelar a quantidade de luz que a cultura recebe traz grandes benefícios para o tipo de produção e qualidade que a EA em estudo pode conceder à cultura, estabilizando os parâmetros de luz nas condições de crescimento natural definidas pelo produtor, para o crescimento das plantas. Isto significa que podemos prolongar a exposição de luz e controlar a duração da escuridão através de sistemas automáticos controlados pela EA.

Cory Mitchell, professor de horticultura na Universidade de Purdue, afirma que “é muito difícil para a indústria de estufas produzir tomates fora de época”. A razão deve-se aos custos de energia elevados na aplicação de luz artificial nos tomateiros, fora da época de produção (Mitchell et al., 2013). As estufas devem ser aquecidas, e os dias mais curtos e nublados vão exigir uma iluminação onerosa à estufa. O caso da plantação do tomate, uma planta de dia longo, enunciado anteriormente, rebate a necessidade de dotar a estufa com luz artificial para os dias mais curtos mas fazendo-se acompanhar de uma atenção redobrada para os gastos energéticos que irão ser exigidos pelo tomate e que deverão ser controlados para níveis rentáveis. Um brainstorming a diversos produtores, identificou os intervalos correspondentes ao período de exposição de luz numa cultura de tomate, à qual corresponde a uma mínima de 6 horas ao ar livre e entre 6 - 8 horas numa estufa. Mais horas de luz produzem melhores resultados em termos de qualidade e quantidade, uma vez que a adição de luz irá aumentar a produção do fruto.

Relativamente à produção industrial de tomates em estufas, muitos produtores estão equipados com sistemas de iluminação artificial cujo PPFD se situa na faixa dos 100-200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, com gastos de energia na ordem dos 35 – 200 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ e que permitem a produção de frutos para o ano inteiro (Verheul et al., 2012). O uso de luz artificial na produção de tomate pode chegar aos realísticos 125 - 140 kg m^{-2} ao ano quando foram expostos 220 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD durante 18 horas na Noruega (Verheul et al., 2012), um país com reduzidas horas de sol diárias. A experiência realizada por Michèl J. Verheul, em “*Optimizing a year-round cultivation system of tomato under artificial light*”, conseguiu uma produção de tomates de 101 kg m^{-2} na sua primeira cultura em estufa, com recurso a luz artificial em complementação à luz solar. No seu artigo, Verheul diz que é obrigatoriamente necessária a utilização de sistemas de luz artificial nos países nórdicos para que se consiga uma produção para o ano inteiro. A experiência prática conduzida em pepinos por este investigador mostrou um significativo aumento na produção que cresceu de 40 para 180 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. A maior parte dos produtores nacionais de tomate produzem cerca de 40 – 45 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

No que concerne à sua alocação na estufa, este atuador S1.3.1, colocado no alto da cobertura da estufa, poderá tornar-se ineficiente, pois quanto mais alto estiver esta luz artificial suplementar, mais dispersão de fotões haverá pela área da cultura, o que reduzirá a quantidade de PPFD por planta. Por conseguinte, exigir-se-á uma proximidade desta instrumentação à cultura, o que poderá fazer com que haja uma contradição entre substâncias, nomeadamente com a câmara infravermelha, como ilustrado na Figura 4.13.

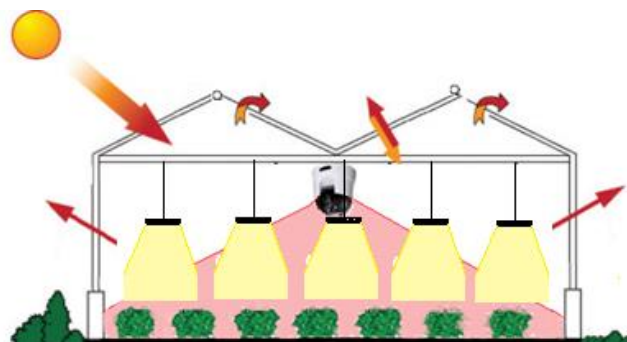


Figura 4.13 - Ilustração da contradição entre substâncias.

Para corrigir esta contradição de substâncias, e recorrendo à disponibilidade da estrutura em conseguir abrigar mais instrumentação na lateral da sua estrutura, foi utilizada a solução geral 3 da Análise Substância - Campo, para alocar o sensor de IV, numa das colunas de suporte da EA, a fim de não prejudicar o sistema de luz artificial. Esta solução exigiu o princípio inventivo número 10, a “ação prévia”, a fim de organizar os objetos para que eles possam entrar em ação numa posição conveniente. Este princípio de invenção foi identificado através do resultado entre os parâmetros de engenharia número 18, o “brilho”, a ser melhorado e o parâmetro número 38, “nível de automação”, que seria prejudicado no sentido em que passaríamos a desconhecer o estado de saúde das culturas sem a hipótese de dar uma resposta pronta quanto necessário. A disposição dos dois dispositivos não deverá influenciar a receção de dados relativos à saúde da cultura agrícola sem comprometer um eventual rebaixamento dos instrumentos de iluminação artificial. A recolocação do sensor IV irá trazer ao sistema outros benefícios, uma vez que a recolocação deste na lateral de um módulo, vai servir também para a verificação e recolha de dados afetos à cultura do módulo adjacente ao primeiro. A necessidade de uma estrutura robusta enunciada anteriormente ajudou a solucionar contradições que completam não só as substâncias principais, como ajudam a completar interações entre subsubstâncias, que neste caso servirá para alocar dispositivos variados sem que haja necessidade de criar um novo suporte. A nova disposição dos dispositivos é observada pela Figura 4.14.

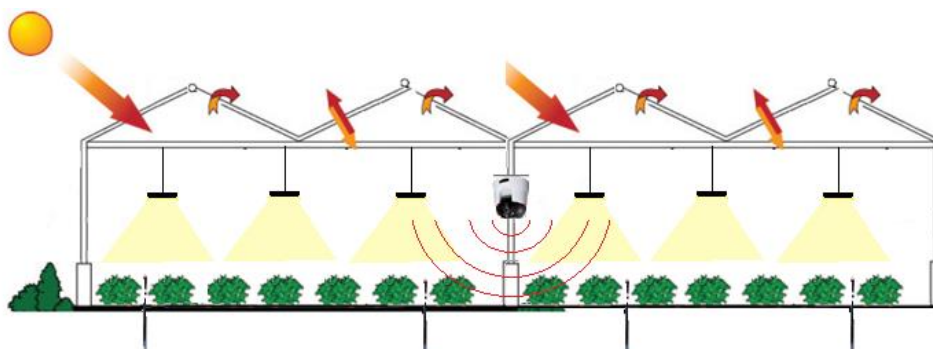


Figura 4.14 - Colocação de sensores e atuadores sem contradições.

ii) S1.3.2 - Aquecimento

A radiação proveniente do sol incide na estufa agrícola com um determinado comprimento de onda, que penetra no material de cobertura até aos objetos contidos no seu interior. Parte desse comprimento de onda é alterado quando absorvido pelas plantas, o que faz com que o material de cobertura atue de forma opaca ao comprimento de onda refletido, conservando a temperatura interior (efeito de estufa). As estufas servem, por isso, para fornecer e manter temperaturas ideais para o crescimento das plantas. O aquecimento pode ser necessário durante todo o ano e não apenas no Inverno. E mesmo nessa situação, o calor deve, idealmente, ser aplicada o mais baixo possível na EA para evitar gastos desnecessários de energia. Os sistemas de aquecimento servem e devem compensar as perdas de calor por radiação, renovação de ar, condução, convecção, por fugas na estrutura ou pelo solo. No geral, convecção é a transferência de calor de um local para outro pelo movimento de fluidos e neste caso, acontece quando se mistura ar quente com ar frio em circulação. A perda de calor por condução entende-se por transferência de energia térmica entre átomos e/ou moléculas vizinhas devido a um gradiente de temperatura. Neste caso, a perda de calor, por condução, acontece através dos materiais da estufa. A radiação, no contexto da transmissão de calor, consiste no transporte de energia por meio de ondas eletromagnéticas. A radiação, ao contrário da condução e da convecção, não necessita de um meio material para que a transferência de energia se efetue. Grande parte do calor numa estufa, é perdido por condução nos materiais de cobertura, enquanto que cerca de 10% dessas perdas estão atribuídas a fugas na estrutura. Também há perdas de calor por radiação. Materiais como o vidro retêm 96% de toda a radiação que incide no seu interior, enquanto que um filme polietileno, menos eficiente nessa contenção, perde mais de 50% de calor por radiação para o seu exterior (Bartok, 2001). Projetar um sistema de aquecimento para a noite mais fria exetável é um critério para calcular a capacidade máxima de aquecimento necessário. A quantidade de calor que pode ser transferida para o exterior da estufa, dependente do tipo de material usado na sua cobertura. Na Tabela 4.1, podemos visualizar os coeficientes de transferência de calor dos diferentes tipos de materiais utilizados nas estufas (Bartok, 2001).

Tabela 4.1 - Coeficiente de transferência de calor para cada tipo de material (Bartok, 2001).

Materiais	% de transmissão de luz	U (coeficiente global de transmissão de calor)	Vida útil (anos)
Vidro	88- 93	1.1	+ 25
Vidro Duplo	75- 80	0.7	+ 25
Acrílico	90	1.13	+ 30
Acrílico Duplo	84	0.49- 0.56	+ 30
Polycarbonato	90	1.1	10- 15
Polycarbonato Duplo(6- 10mm)	78- 82	0.53- 0.63	10- 20
Polycarbonato Triplo(8- 16mm)	74- 76	0.42- 0.53	10 -20
Polietileno	78	1.2	3- 4
Polietileno Duplo	78	0.7	3- 4

A quantidade de calor perdido depende do coeficiente de condutividade dos seus materiais de cobertura. O ar exterior em contacto com a cobertura de uma estufa aquecida, vai remover o seu calor através de convecção de uma forma contínua. Se desprezarmos a necessidade de renovação de ar e a perda de calor pelo solo, podemos calcular a perda de calor aproximada da EA em estudo, de acordo com a definição de coeficiente global U, o coeficiente de transferência térmica global U é a medida global de uma série de barreiras condutivas e convectivas para transferir calor e pode ser usado para determinar a transferência de calor total entre o interior da estufa e ambientes externos pela seguinte relação:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

q – energia térmica

U – Coeficiente de transmissão térmico

A – Área de superfície do calor transferido

ΔT – Diferença das temperaturas no interior da estufa e no exterior

Temperaturas críticas atuam sobre as funções vitais dos vegetais. Abaixo dos 0°C ou acima de 70°C, surgem consequências irreversíveis para as plantas que levam à cessão das suas funções vitais ou entorpecendo-as, respetivamente (Bidlack et al., 2003). As temperaturas ótimas (outsourcing realizado com produtores) estão indicadas na Tabela 4.2. Juntamente com esses valores, estão também os valores estimados para a perda de calor proveniente da EA quando se regista a temperatura mínima média na cidade de Lisboa: -1°C (Instituto Português do Mar e Atmosfera, 2016). Todavia, dependendo do tipo de sistema e da sua respetiva eficiência na função de aquecer a estufa, e do tipo de cobertura usada, podemos conhecer a quantidade de energia que deve ser reposta, para manter o nível de produção de vegetais na sua temperatura adequada de funcionamento. Esses valores determinam a potência para a qual deveremos dimensionar o nosso sistema de aquecimento. Esses valores estão indicados na Tabela 4.2, para a temperatura adequada de produção biológica de cada espécie, em W·m⁻², para uma estufa de 300 m², através dos diferentes tipos de materiais, para os diferentes tipos de vegetais a cultivar.

Tabela 4.2 – Perdas de calor em W·m⁻².

Produto	Temp. Adequadas	Vidro	Acrílico	Policar.	Policar. Duplo	Polietileno	Polietileno Duplo
Alface	14-18 °C	30,98	31,83	30,98	14,93	33,80	19,72
Espinafre	15-18 °C	33,05	33,95	33,05	15,92	36,05	21,03
Ervilha	16-20 °C	35,11	36,07	35,11	16,92	38,30	22,34
Acelga	18-22 °C	39,24	40,31	39,24	18,91	42,81	24,97
Aipo	18-25 °C	39,24	40,31	39,24	18,91	42,81	24,97
Feijão	18-30 °C	39,24	40,31	39,24	18,91	42,81	24,97
Tomate	20-24 °C	43,37	44,56	43,37	20,90	47,32	27,60
Pimento	20-25 °C	43,37	44,56	43,37	20,90	47,32	27,60
Pepino	20-25 °C	43,37	44,56	43,37	20,90	47,32	27,60
Beringela	22-27 °C	47,50	48,80	47,50	22,89	51,82	30,23
Melancia	23-28 °C	49,57	50,92	49,57	23,88	54,08	31,54
Melão	25-30 °C	53,70	55,17	53,70	25,87	58,58	34,17
Aboborinha	25-35 °C	49,57	50,92	49,57	23,88	54,08	31,54

Uma vez que teremos fornecimento de energia fotovoltaica, temos, consequentemente, calor a ser gerado nas células fotovoltaicas, devido ao funcionamento das mesmas. Temos exemplos de módulos fotovoltaicos, que conseguem registar temperaturas nas células fotovoltaicas acima dos 30 °C só em Janeiro. Este calor dissipado dos módulos vai perder-se, por convecção, sob forma de calor para o interior da estufa e sobre forma de condução para o exterior da estufa. O que manterá por um determinado momento os parâmetros de temperatura adequados de produção sem recurso a qualquer sistema de aquecimento. Deve referir-se, nesta parte, que não está definido nenhum instrumento de aquecimento específico para este sistema em particular, devendo fazer-se um estudo profundo para o sistema de aquecimento adequado à cultura em causa. Esse estudo, mais aprofundado, servirá para garantir um sistema de aquecimento ótimo que aproveite a dinâmica energética do interior da estufa. Esse estudo a ser realizado deve basear-se sob as mesmas linhas de orientação na busca de eficiência energética e sustentabilidade da mesma. Mesmo assim, e como foi referido anteriormente, os produtores em estufa devem estar cientes do problema do consumo de energia para aquecimento que ocorre durante os períodos de Inverno. Por isso, devem fazer-se esforços para minimizar o consumo de elétrico e maximizar a utilização de energia. Em Lisboa, são raras as vezes onde serão necessárias intervenções de urgência no aquecimento devido ao seu clima mediterrânico, no entanto, o aquecimento terá um papel fulcral na sustentabilidade energética numa estufa “inteligente”. A Figura 4.15 ilustra a variação de temperatura para o clima mediterrâneo (no sul de Espanha), com o mesmo tipo de clima que encontramos em Portugal. Poderá ser projetado um tipo de aquecimento discreto para a estufa “inteligente” conciliando as trocas de energia entre os vidros fotovoltaicos e o interior da EA. Este é um aspeto que poderá manter a temperatura adequada mesmo em períodos de Inverno. Em casos de uma emergência temporária, é possível evitar a catástrofe, sem fornecer calor artificial, com a produção de fumo ou vapor de água dentro da estufa.

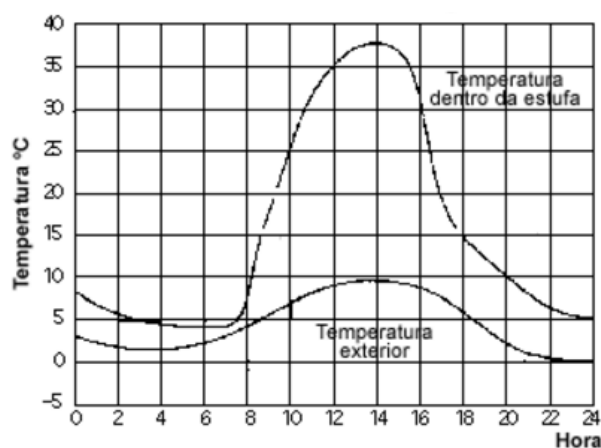


Figura 4.15 -Variação das temperaturas diárias numa estufa (Soler Palau, 2006).

iii) S 1.3.3 -Ventilação

Há duas razões importantes para a necessidade de arejar o interior de uma EA: (1) remover o excesso de calor através de ventilação assim que a temperatura aumenta, e (2) para controlar a humidade relativa e o dióxido de carbono nas culturas. De acordo com (Heuvelink & Bakker, 2005) existem três métodos para arrefecer uma estufa: (1) ventilação natural, (2) sistema de ventilação ativa, forçando a circulação de ar com recurso a ventoinhas e (3) sistema de aspersão de água. Várias soluções existem para casos específicos, mas sem um método de remoção do excesso de calor acumulado, as temperaturas atingem níveis prejudiciais ao crescimento das culturas. O propósito de um sistema de ventilação é o de prevenir o aumento de temperatura no interior da estufa permitindo a saída de ar quente com a entrada de ar fresco proveniente do exterior. Ao renovar o ar da estufa, repõe o nível de CO₂ necessário à fotossíntese das plantas, e também evita fenómenos de inversão térmica (ocorre quando a temperatura é mais baixa no interior do que no exterior na estufa) no período noturno. Para estufas de produção agrícola, o sistema de ventilação deve combinar ventilação passiva e ventilação ativa.

Um sistema de ventilação passiva opera pelo princípio das diferenças de pressão e pelos gradientes de temperatura (Heuvelink & Bakker, 2005). A temperatura aumenta, o ar quente expande-se e a pressão no interior da estufa aumenta. Esse aumento de pressão no interior da EA, faz mover o ar pelos sistemas de ventilação, empurrando a massa de ar através de aberturas sensíveis a esta pressão, diretamente para o seu exterior (Bartok, 2001). Quanto maior for a diferença de temperaturas entre o exterior e o interior, maior será a movimentação de ar. Um exemplo de ventilação passiva pode ser analisado na Figura 4.16. O ar exterior, a uma temperatura inferior, entra pela lateral para repor o ar quente da EA, fazendo assim baixar a temperatura interna (Bartok, 2001). A massa de ar quente ascendente saindo por uma abertura, pela janela zenital, situada no topo da estufa. Assim que o ar renovado entra por aberturas inferiores, estabelecem-se correntes de ar que ventilam o interior da EA. Este sistema revela-se bastante eficiente, uma vez que regenera toda a massa de ar quente acumulada na parte superior da estrutura. E bastante útil para a EA em estudo uma vez que se gerará calor proveniente do sistema fotovoltaico.

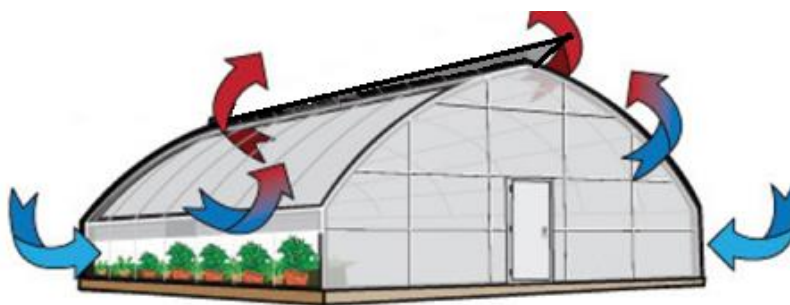


Figura 4.16 - Exemplo de ventilação passiva com recurso a uma janela zenital (Sanford, 2001)

A ventilação obtida por este sistema depende do gradiente de temperatura interior-exterior, da intensidade e da direção do vento e da dimensão da estufa (Bartok, 2000). À medida que

aumentamos a área da EA, aumentamos a necessidade de ventilar o seu interior (Bartok, 2000). Para obter uma boa distribuição de ar deve-se abranger toda a longitude da estufa e, para épocas frias ou eventualmente para poder regular a humidade, é necessário poder fechar de forma progressiva, parcial ou total estas aberturas (Bartok, 2000). A manobra pode ser manual ou automática, mas sempre será conveniente se for mecanizada e executado por um sistema automático, porque requer aberturas e fechos diários. Em mudanças climáticas bruscas, esse aspeto torna-se ainda mais preponderante, pois é preciso reagir com rapidez a qualquer instante, daí a importância de um sistema automático.

Para as culturas produzidas em estufas, condicionar a renovação de ar pode resultar em desequilíbrios de oxigênio e dióxido de carbono. A falta de movimento de ar e dióxido de carbono limitado retardará o processo de fotossíntese na planta, o que poderá ser prejudicial para o nível de crescimento global das culturas. Uma boa circulação de ar é importante para a estufa para gerenciar a humidade relativa do ar. As plantas respiram continuamente, aumentando a humidade em torno das folhas. Em geral, as plantas desenvolvem-se corretamente com níveis de humidade entre 60% e 80%, se a humidade relativa for superior a 90% é reduzida a transpiração e o desenvolvimento da planta é prejudicado (Bartok, 2001). A condensação excessiva de humidade no teto da estufa leva a uma perda da transmissão da luz no interior da estufa, tornando-se um fator limitante no Inverno, e contribui para o aparecimento de doenças nas plantas. Por sua vez, um baixo nível de humidade relativa abaixo de 30%, provoca o fecho dos estomas, o pode causar problemas e agravar o *stress* por calor (Bidlack et al., 2003). Por estas razões, o controlo da humidade é importante do ponto de vista da saúde da cultura. Quanto mais vezes o ar é renovado, mais o indicador da humidade relativa vai baixar. Esse facto é demonstrado com recurso ao trabalho desenvolvido e liderado por Dennis E. Buffington, professor e chefe de departamento de Engenharia Biológica e Agrícola da Universidade do Estado da Pensilvânia, na Figura 4.17. Buffington quantifica a relação existente entre a humidade relativa dentro de uma estufa e o número de vezes que o ar deve ser renovado por hora mantendo uma temperatura interior da estufa a 15° C. Esta ação salvaguarda o valor de humidade relativa abaixo do nível crítico. Explica o gráfico, que este procedimento deve realizar-se sempre em conjunto com aquecimento do ar proveniente do exterior. Esse aquecimento vai aumentar a temperatura do ar proveniente do exterior que entra na estufa menos saturado de vapor de água substituindo o ar humedecido em volta das folhas devido à respiração das plantas (Buffington et al., 1987).

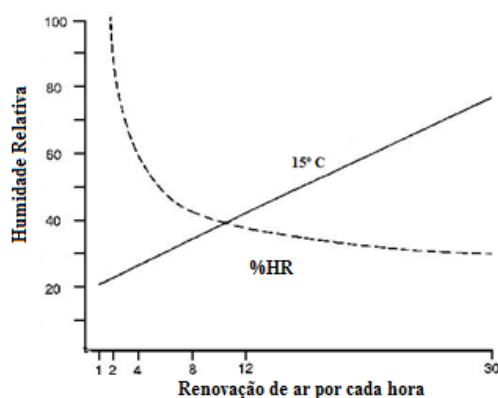


Figura 4.17 - Relação entre a renovação de ar por hora e a humidade relativa dentro da estufa (Buffington et al., 1987).

Já durante o Verão, ou para dias naturalmente quentes, a causa para as temperaturas altas dentro da estufa, deve-se ao grande influxo de radiação solar para o interior da mesma. Nesta altura, a ventilação deve ser feita à altura das culturas de modo a prevenir a acumulação de calor em torno das plantas (Bartok, 2000). Geralmente, muitos produtores escolhem renovar o ar uma vez a cada minuto. Uma desvantagem do uso frequente do sistema de ventilação é o seu custo operacional sobre a eletricidade usada para este efeito (Buffington et al., 1987). Independentemente do rácio de ventilação da estufa no Verão, a temperatura interior nunca irá estar tão baixa como a exterior. Este é um dos principais problemas nas estufas de grandes dimensões, é que o ar aquece à medida que se movimenta de uma extremidade para a outra verificando-se uma acumulação de calor no interior da EA (Buffington et al., 1987). Quanto maior for a distância entre extremidades, maior será o aquecimento do fluxo de ar que se regenera. Mais uma vez, considero que se deve fazer um estudo computacional de dinâmica de fluídos para este caso específico e simulando dados de uma localização específica. Os sensores de humidade relativa interna e humidade relativa externa, de temperatura de ar no interior e exterior da estufa são parte integral do sistema de ventilação no controlo desses mesmos parâmetros acionando as pás de ventilação e abrindo ou fechando a janela zenital conforme a necessidade do momento. A Figura 4.18 representa o sistema de ventilação da EA “inteligente”. A janela zenital controlará continuamente a temperatura do interior da estufa através da área de abertura que operará para diferentes ângulos. A ventilação ativa, atuando nas laterais da EA, irá operar para controlar os níveis de CO₂ e humidade no interior da estufa para os parâmetros definidos. Quanto ao sistema de aspersão, uma vez que o clima é mediterrâneo, para períodos de dias quentes, o sistema de aspersão de água estará controlará a humidade relativa para assegurar que o nível de humidade se situe à volta dos 70-80%, consoante os parâmetros biológicos da cultura (Buffington et al., 1987). Na figura observamos a entrada e saída de ar, representada pela seta a azul e a vermelho respetivamente, quer pelas janelas laterais da estufa quer pela janela zenital.

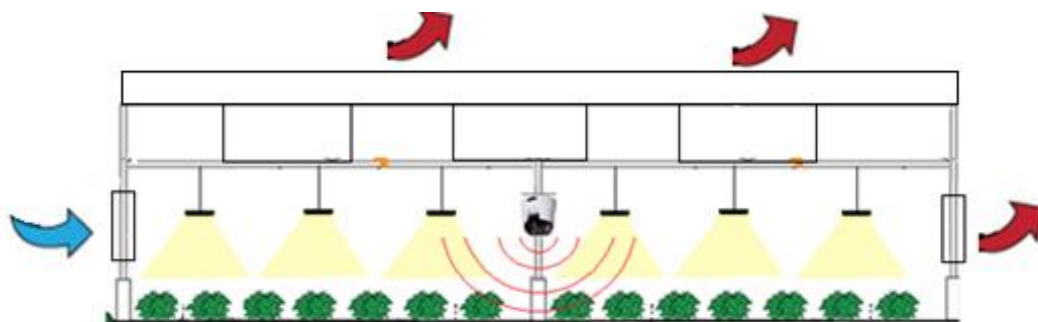


Figura 4.18 - Sistema de ventilação da EA sem qualquer contradição substancial.

iv) S1.3.4 - Irrigação

A irrigação agrícola é uma técnica antiga com já vários métodos e sistemas de irrigação desenvolvidos. A análise do solo e da água para a rega é essencial para que os agricultores possam disponibilizar às plantas as melhores condições de forma a obterem o máximo rendimento e qualidade das suas colheitas. Isto é, água acima do ideal representa desperdício, com gastos desnecessários, danos ao ambiente e favorece o surgimento de doenças. Água abaixo do

necessário causa perdas de produtividade. É importante controlar o caudal de uma forma eficiente. Isto possibilitará a produção agrícola controlada em regiões de recursos hídricos escassos. Adicionalmente surgirá a necessidade de se adicionar uma substância S3, responsável pela irrigação e distribuição de água e nutrientes fundamentais da planta. A entrada desta substância fica à margem de S1 pois não depende necessariamente de responder a fatores externos. No entanto, S3 contribuirá para a eficiência e funcionalidade da EA “inteligente”. A disposição da sua alocação está representada na Figura 4.19 e representa o tipo de sistema de irrigação mais usado na agricultura, onde apenas a necessidade de 1 bomba de água satisfaz o sistema de distribuição canalizado.

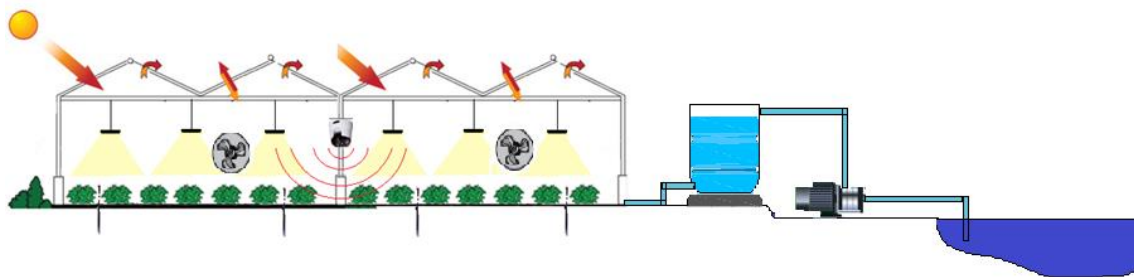


Figura 4.19 - Diagrama com o sistema de irrigação incluído.

v) S1.3.5 – Sombreamento

Para culturas tolerantes ao sol total, como tomates, pepinos e crisântemos, o sombreamento nunca é necessário para limitar a intensidade da luz solar. Estas culturas são perfeitamente capazes de suportar e utilizar todo o poder do sol. No entanto, existe frequentemente a necessidade de proporcionar sombra como um meio de limitar o acúmulo de calor no ar da estufa e nas superfícies das folhas (Bidlack et al., 2003). Além disso, alguns sistemas de sombra internos, se cuidadosamente utilizados, podem ser parcialmente eficazes para ajudar a diminuir o *deficit* de pressão de vapor nos dias quentes com um elevado nível de intensidade solar. Para culturas de baixa luminosidade, as plantas de dia-curto (Taiz & Zeiger, 2002), a sombra é usada como meio necessário para limitar a radiação solar total. A intensidade luminosa é monitorizada na EA “inteligente”, por isso, é possível automatizar dispositivos de sombreamento capazes de controlar a luminosidade quando em excesso. O sistema de sombreamento é representado através de uma ilustração na Figura 4.20, meramente indicativa.

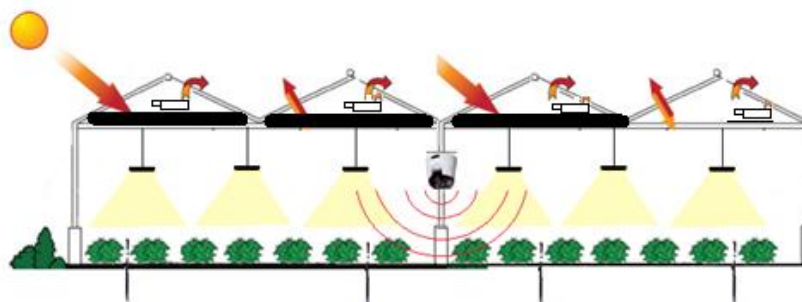


Figura 4.20 - Sistema de sombreamento da EA “inteligente”.

Um motor, fixado no topo da estrutura na lateral Este, é acionado para fazer correr uma tela de sombreamento sobre as culturas. Telas de sombreamento já existem no mercado das estufas, no entanto, grande parte destas telas são colocadas manualmente só em períodos de Verão, tornando este sistema pouco prático quando realizado para terrenos agrícolas de grandes dimensões. Nos dias em que o sol é intenso, dias típicos de Verão, a produção de eletricidade no sistema fotovoltaico é elevada, o que faz com que não haja qualquer impedimento de maior para a aplicação da eletricidade produzida ser utilizada no sistema automático de sombreamento. Todos os dias e sem qualquer prejuízo económico para o produtor. Estas telas são eficazes na redução dos níveis de luz sobre a cultura, no entanto, fazem pouco para limitar o acúmulo de calor dentro da estufa. Mas uma vez que a grande parte do calor se acumula acima destas telas, esse calor acaba por ser removido para fora da estufa pela janela zenital. Embora também ocorra alguma acumulação de calor sob as telas (em proporção inversa à % de sombra) (Giacomelli et al., 1993), o ar aquecido pode subir através das telas se forem suficientemente porosas. Se houver abertura de janelas para ventilação nas paredes laterais da estufa, esta tela pode não ser necessariamente porosa (Giacomelli et al., 1993). Outros parâmetros que podem ser usados para controlar o comportamento de dispositivos de sombreamento incluem estratégias de abertura e fecho, como operações de pulverização ou sincronização com aquecimento, ventilação, controle de umidade e suplementação de CO₂. Os programas de controlo mais flexíveis permitem a integração de vários parâmetros ao mesmo tempo. Por exemplo, um sistema de sombra pode ser programado para operar da seguinte maneira:

- Fecho da tela de sombreamento se a intensidade da luz do sol ultrapassar os 600 W·m⁻² em culturas sensíveis à luz,
- Fechar se as temperaturas descenderem abaixo dos 5° C para conservar calor no interior da estufa,
- Fechar a tela para uma percentagem de área da estufa, favorável à permacultura (vários tipos de cultura na mesma área).

O sistema de luz artificial, visto anteriormente, fornece à EA luz suplementar na falta de horas de sol de uma dada região para uma determinada cultura. Já o sistema de sombreamento, proporciona à EA a capacidade de regular o nível de luz sobre as culturas quando os níveis de luz são demasiado intensos. A estufa “inteligente” está agora dotada de automatismos capazes de regular a intensidade da luz para os parâmetros de qualquer cultura.

4.2.1 – Produção elétrica na estufa agrícola

A evolução de técnicas agrícolas e o domínio de fatores externos têm determinado a eficiência de uma colheita. Ao realizarem a sua produção, muitos produtores são capacitados para compreender todas as necessidades inerentes ao cultivo em determinados ambientes. Tudo isto só é possível graças à disponibilidade de informação e conhecimento de técnicas agrícolas e à evolução da tecnologia no sector, que também recebe o nome de agricultura de precisão. Ora, creio, que, a agricultura não seria de precisão se a este sector, não estivesse inerente a entrada de sistemas automatizados. Em estufa, os produtores recorrem cada vez mais a sistemas semiautomáticos e automáticos para uma produção de cultivo. A automatização da maioria dos processos reduz o trabalho do homem, gera serviços menos propensos a erros, o que aumenta a produção e melhora

as taxas de retorno. Atualmente, diminui a possibilidade de acidentes de trabalho, contribui para o cumprimento de prazos e reduz os custos da produção. A procura pela qualidade e eficiência na produção agrícola acarreta algumas preocupações no uso diário e constante destes sistemas. O aumento contínuo dos preços da eletricidade tem limitado o seu uso e são um fator de bloqueio no *set-up* da produção de médio a longo prazo. Por outro lado, o desenvolvimento que as tecnologias de energia renovável vão adquirindo, vão tornando os seus equipamentos de geração elétrica mais eficientes e têm reduzindo o tempo para os retornos económicos, que são cada vez mais rápidos. A agricultura é o sector onde a utilidade das energias renováveis se apresentam com maior potencial. Para além de proporcionar eletricidade a custo zero, proporciona também eletricidade para mais sistemas automáticos. O aproveitamento destes benefícios poderá ser sinónimo de redução de custos de produção e consequentes ganhos de competitividade. Conseguir produzir um cultivo de qualidade sem a preocupação de gastos energéticos, respondendo com maior eficiência a fatores externos e trazendo benefícios ao nível da redução dos gastos, nomeadamente na fatura da eletricidade e disponibilidade energética para a sua produção. Como foi visto no capítulo 3.2, identificámos o valor da potência elétrica combinada dos instrumentos automáticos para uma estufa de 150 m². No entanto, o desenvolvimento desta dissertação e a consolidação da sua aplicação é feita para uma estufa modular de 300 m². Na Figura 4.21, estão representados dois módulos de EA de 300 m² desenhados em SolidWorks. No topo sul (representado por vidros de cor verde) da cobertura, estão dispostos os vidros fotovoltaicos que irão converter a radiação solar em eletricidade na EA. Definido pelo método TRIZ como o campo do sistema, o vidro fotovoltaico transparente, para além de produzir eletricidade, permite a entrada da luz solar para o seu interior, com uma transparência que pode variar entre os 10 a 20% (especificidades de dois tipos de vidro fotovoltaico pelo fabricante). Esta transparência é suficiente para não obstruir a entrada de luz natural à necessidade das colheitas.

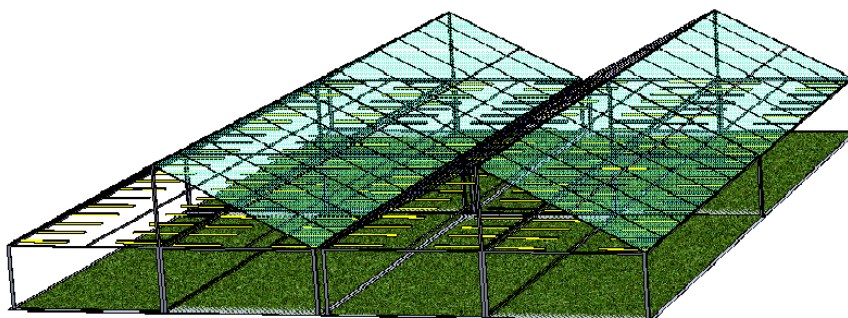


Figura 4.21 - Representação ilustrativa dos vidros fotovoltaicos na EA em Solidworks.

O dimensionamento dos vidros fotovoltaicos está intrinsecamente relacionado com o dimensionamento da estrutura. Para que a eficiência da captação de radiação solar seja máxima, os módulos fotovoltaicos terão de estar colocados de maneira a que radiação solar incida diretamente sobre as suas células e que acompanhem a trajetória do sol durante o máximo tempo possível. A intensidade da irradiância solar depende da altura a que está o Sol na Terra e, para isso, deverá ter-se em conta a “declinação solar”, cujo ângulo é formado pela linha que une o

centro do Sol ao centro da Terra e o plano do equador varia entre $\pm 23,45^\circ$ e assume-se uma variação sinusoidal num ano de 365 dias como ilustra a Figura 4.22.

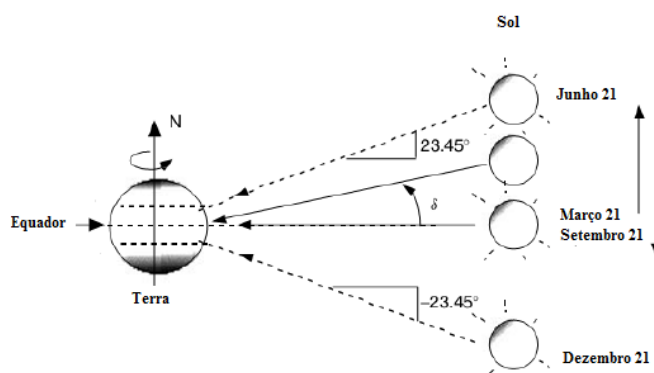


Figura 4.22 - Declinação solar durante os 365 dias do ano (Solanki, 2013).

Outro parâmetro a ter em conta é o ângulo de “altitude solar”, que é definido pela altura do Sol na Terra e a horizontal, e que é, de certa forma, fundamental para determinar o ângulo ideal da instalação fotovoltaica na estrutura, porque serve, igualmente, para determinar eventuais sombras sobre o respetivo equipamento. Para definirmos esse ângulo, e para que se maximize a energia fotovoltaica autoconsumida, teremos que maximizar o espaço de receção de luz para o dia mais curto do ano, dia 21 de Dezembro, devido à declinação mínima do Sol em relação à Terra, pois é neste dia que se verifica o sombreamento máximo no topo da estrutura. Esse ângulo determinará a inclinação do teto da estrutura da estufa de modo a que os vidros fotovoltaicos recebam luz diretamente e para que se maximize a energia autoconsumida no período de Inverno que é quando existe uma maior necessidade de energia. Se o ângulo do teto da estrutura aumentar, vai aumentar também o sombreamento sobre os módulos fotovoltaicos seguintes, o que, consequentemente, não beneficiaria a captação de radiação solar de modo eficiente. Essa importância é demonstrada na ilustração da Figura 4.23, com os vidros fotovoltaicos direcionados para a trajetória do Sol.

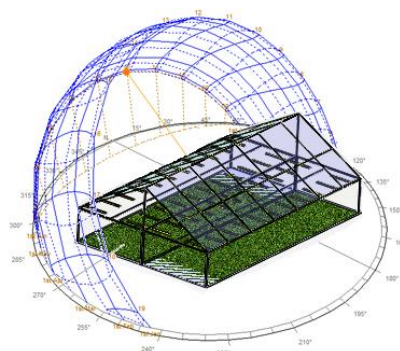


Figura 4.23 - Ilustração do posicionamento dos módulos fotovoltaicos em relação à trajetória solar (adaptado de Solanki, 2013).

A radiação solar é, por isso, sempre maior numa área que se estende perpendicularmente aos raios solares, do que numa área horizontal, paralela ao solo, nas mesmas dimensões e condições. E uma vez que o azimuth, ângulo medido entre o Sol e a direção norte-sul, e a altura solar, mudam ao longo do dia e do ano, o ângulo de incidência da radiação solar vai sempre variar (Pereira &

Oliveira, 2011). A análise da radiação anual ajuda a equacionar a conveniência das inclinações dos módulos, para aproveitamento solar e rentabilidade energética. Para ilustrar este aspeto, a Figura 4.24 representa a irradiação solar anual que incide numa área de um metro quadrado, em função do azimute e da declinação solar, na região de Lisboa, dada em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

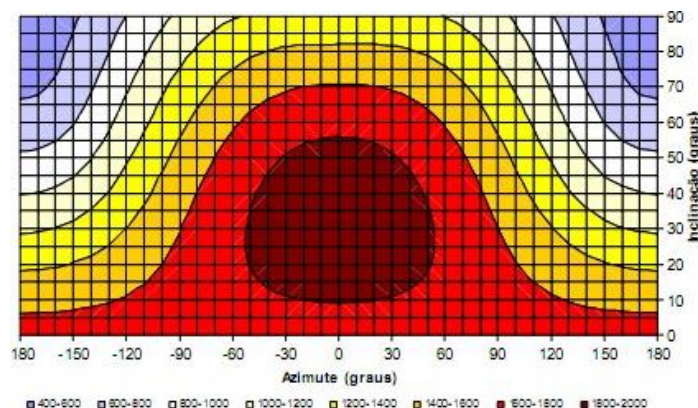


Figura 4.24 - Irradiação solar anual em função do azimute e da declinação solar (Pereira & Oliveira, 2011).

É, portanto, fundamental, começar-se por definir em qualquer projeto da estufa “inteligente” em estudo, a inclinação do teto da estrutura em função da declinação solar da região em questão. Isto é, que se deve dimensionar a estrutura em função do ângulo ótimo solar, para, objetivamente, ter à disposição um melhor aproveitamento solar. Relativamente ao azimute, a orientação da EA está sob o condicionamento do modelo de orientação definido pelos autores de construção de estufas Kumar e Tiwari, que referem a importância de dar a lateral da estufa ao sul para um maior aproveitamento solar por parte das culturas. Isto é, que o nosso campo, definido para o nosso sistema, está também ele de acordo com a metodologia de projeto indicada na secção 3.1.3. Definida esta condição, focamos a atenção agora para os sobreamentos possíveis da EA “inteligente” e verificar conflitos em possíveis sobreamentos. Para que hajam condições de ventilação de forma eficiente, deverá verificar-se se a ventilação passiva no teto da estrutura, a janela zenital, não representa uma contradição para o sistema.

Caso venha a existir, o sobreamento sobre os módulos fotovoltaicos da EA adjacente causados pela abertura no topo da primeira EA, vão reduzir a eficiência dos fotovoltaicos e haverá uma perda energética substancial na própria estufa. No entanto, tendo em conta os critérios de dimensionamento anteriores, que nos levou ao dia mais curto do ano, dia 21 de Dezembro, um dia de Inverno, onde as temperaturas apresentam-se tipicamente baixas, e de outros fatores anteriormente revistos relativos à ventilação de estufas para este tipo de dias, indicam-nos que não haverá necessidade de abrir esta janela nestas condições, no topo da estufa, uma vez que esse trabalho está incumbido à ventilação ativa, realizada na parte inferior da estrutura da estufa.

Teoricamente, conclui-se, que não há qualquer constrangimento de um hipotético sobreamento sobre os módulos fotovoltaicos à estufa seguinte. A janela zenital que abre no topo da estufa, deverá estar programada para não abrir mais do que o ângulo de sobreamento, que poderia causar alguma deflexão dos raios solares. No Verão, onde a necessidade de ventilação é maior, o ângulo de sobreamento apresenta-se demasiado curto e as janelas poderão estar completamente abertas sem problemas de maior. Para uma eficiência de ventilação ótima, a abertura no topo da estrutura, deverá ter uma área não maior que 20% da sua área de cultivo (Bartok, 2000), que para

as dimensões da estufa considerada, não apresentará um comprimento de janela maior que 2 metros. Na Figura 4.25, está representado o sombreamento máximo, quando se verifica o rendimento solar máximo nos fotovoltaicos do dia que ocorre às 12h, para o dia 21 de Junho. Para a abertura máxima possível da janela zenital, verifica-se que não haverá sombreamento sobre os módulos fotovoltaicos, sem possível conflito para o funcionamento dos mesmos.

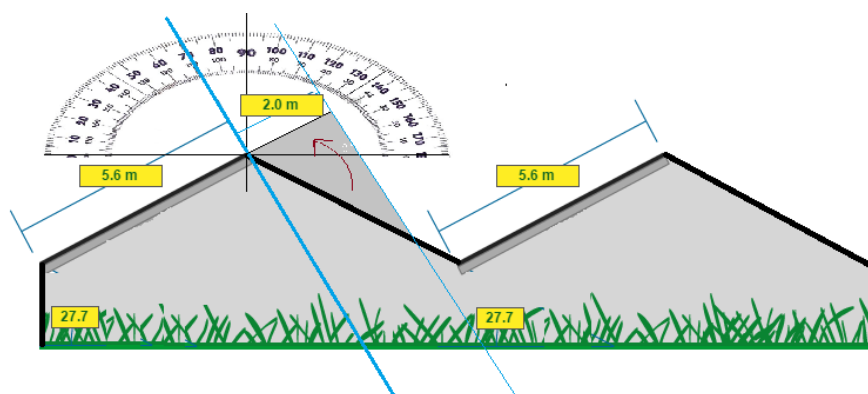


Figura 4.25 - Ilustração dos sombreamentos na estrutura da estufa (adaptado de GreenPro, 2004).

A eficiência de um vidro solar é basicamente a percentagem de energia proveniente do sol que o vidro fotovoltaico converte em energia elétrica por metro quadrado. A eficiência é medida em condições de laboratório, *Standard Testing Conditions* (STC). STC significa "condições normais de ensaio" e são os padrões da indústria solar para as condições em que um painel solar é testado. São três condições padrão (Solanki, 2011):

- Temperatura da célula a 25° C. O painel solar deve estar a 25 °C durante o teste;
- Irradiação solar = $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Este número refere-se à quantidade de energia que incide sobre uma determinada área em um determinado momento. (A quantidade de energia de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ é uma média da quantidade de luz solar que incide na superfície terrestre (Solanki, 2011));
- Massa de Ar = 1,5. Este número é difícil de medir, uma vez que se refere à quantidade de luz que tem que passar pela atmosfera terrestre antes que possa bater a superfície da Terra, e tem a ver principalmente com o ângulo do sol em relação a um ponto de referência sobre a terra.

A tecnologia existente hoje em dia para os vidros fotovoltaicos é ainda muito recente. Em comparação aos painéis fotovoltaicos, estes apresentam um aproveitamento solar/energia-produzida substancialmente maior (Ex: Potência nominal entre os $100 - 170 \text{ Wp} \cdot \text{m}^{-2}$ enquanto que vidros fotovoltaicos têm uma potência nominal entre $40 - 50 \text{ Wp} \cdot \text{m}^{-2}$). Os vidros solares ainda se encontram num nível de desenvolvimento recente que, tanto como os painéis solares, terão a sua margem de evolução no que respeita ao seu potencial tecnológico.

Os dados relativos ao uso desta tecnologia, que tem como princípio a produção limpa, segura e sustentável de energia, são apresentados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 (Anexo D), onde podemos verificar números já bastante interessantes relativamente ao seu desenvolvimento:

Tabela 4.3 - Descrição elétrica. (Adaptado do catálogo ONYX Solar)

Dados Elétricos		A 1000 W/m ² (STC)
Potência nominal	P _{mpp} (Wp)	92
Tensão à potência nominal	V _{mpp} (V)	99
Corrente à potência nominal	I _{mpp} (A)	0,93
Tensão de circuito aberto	V _{oc} (V)	144
Corrente de curto-circuito	I _{sc} (A)	1,15

Tabela 4.4 - Dimensões físicas do vidro fotovoltaico. (Adaptado do catálogo ONYX Solar)

Descrição Física		
Cumprimento	mm	1245
Altura	mm	1849
Espessura total	mm	12,72
Peso	kg	64,4
Espessura vidro FV	mm	3,2

Tabela 4.5 - Limites operacionais. (Adaptado do catálogo ONYX Solar)

Máxima voltagem no sistema	V _{sys} (V)	1000
Temperatura limite do módulo	°C	[-40,+85]
Temperatura P _{mpp}	%/°C	-0,19
Temperatura V _{oc}	%/°C	-0,28
Temperatura I _{sc}	%/°C	+0,09

A superfície da cobertura onde irão estar fixados os vidros fotovoltaicos, tem a capacidade de dispor 72 módulos. Estes 72 módulos estarão condicionados em 3 fileiras de 24 módulos colocados ao longo da estufa. Pretende-se usar todo o espaço disponível na cobertura voltada a sul, para que seja maximizada a sua produção e que toda essa energia seja usada para fins biologicamente produtivos. Esta maximização tem por objetivo chegar a um valor limite relativo à disponibilidade de produção elétrica possível. Poderá fazer-se um ajustamento, caso seja verificado excesso na produção elétrica, que seja financeiramente adequado aos objetivos do produtor.

Neste caso, no de maximização de produção, em termos energéticos, a EA de 300 m² terá uma potência instalada de 6.624 Wp nas condições STC. Para correlacionar os dados da irradiância e da temperatura em Lisboa (cidade pré-definida para esta dissertação), e calcular uma estimativa com base na potência nominal dos módulos fotovoltaicos, recorreu-se à ferramenta *online*, creditada pela União Europeia, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), disponível em <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>. Os resultados em anexo, pag. 78 (Anexo B) obtidos com os modelos estudados estão disponíveis na Tabela 4.6.

Localização: 38°43'49" Norte, 9°8'21" Oeste,

Dados de radiação solar usada: PVGIS-CMSAF,

Potência nominal do sistema fotovoltaico: 6.6 kW (300 m²),

Perdas estimadas devido à temperatura e níveis baixos de irradiância: 10.8% (para locais de temperatura ambiente),

Perdas estimadas devido ao efeito de reflectância angular: 2.7%,

Outras perdas (cabos, inversores, baterias, etc): 14.0%,

Estimativa de perdas combinadas no sistema FV: 25.4%.

Tabela 4.6 - Estimativa de produção energética anual.

Mês	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	17.400	540	3.34	103
Feb	23.100	648	4.49	126
Mar	28.500	885	5.66	176
Abr	30.200	905	6.08	182
Mai	32.500	1010	6.61	205
Jun	33.900	1020	7.05	211
Jul	34.900	1080	7.34	227
Ago	34.300	1060	7.22	224
Set	30.800	923	6.40	192
Out	25.100	779	5.07	157
Nov	19.300	580	3.81	114
Dez	16.300	506	3.16	98
Média anual	27.200	828	5.52	168
Total de produção ao ano		9.940		2.020

Legenda: E_d : Média diária de produção de eletricidade (kWh); E_m : Média mensal de produção de eletricidade (kWh); H_d : Média diária da irradiação global por metro quadrado recebida pelo sistema fotovoltaico (kWh·m⁻²); H_m : Média mensal da irradiação global por metro quadrado recebida pelo sistema fotovoltaico (kWh·m⁻²).

A produção estimada pelo PVGIS é de 9.940 kWh anuais. Verifica-se que estes valores situam-se dentro de valores executáveis para o nível de automação exigido em estufas. Irá ser feita uma comparação mais à frente entre EA convencionais e EA “inteligente” em estudo. O gráfico da produção elétrica da EA “inteligente” é ilustrado na Figura 4.26:

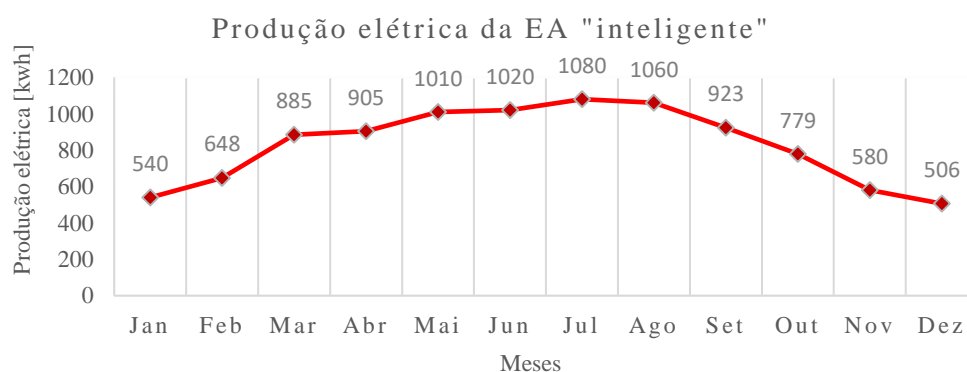


Figura 4.26 - Produção elétrica mensal de uma EA de 300 m² em Lisboa.

Analizamos então a estufa dotada de instrumentos automáticos como os sistemas de ventilação passiva, ventilação ativa, irrigação, humidificação, aquecimento e sombreamento, indicada no capítulo 3.2, com a dimensão de 150 m², exigindo uma potência de 4.960 W combinados entre instrumentos automáticos. Foram calculados os valores de produção elétrica pelo mesmo método, onde foram consideradas mesmas perdas de rendimento e para a sua dimensão, são produzidos 4.930 kWh anuais (Anexo C). Os cálculos realizados para o mês onde os dias são, em média, energeticamente menos produtivos (Dezembro, com 8,530 kWh) consegue-se, mesmo assim, de se dispor de uma quantidade de energia que responderia à demanda energética requerida pelos mesmos instrumentos da estufa. Isto é, se partíssemos do pressuposto que a instrumentação não é acionada para esse dia por mais que 2 horas em contínuo, da qual concluiríamos de ser energeticamente autossuficiente. Mas sabendo da dependência e da discrepância existente nos diversos fatores ligados à produção em estufa, não creio que seja viável admitir a sustentabilidade da estufa através do exemplo demonstrado anteriormente, mesmo que demonstrando que a produção elétrica satisfaz a potência elétrica utilizada neste exemplo para todo o ano. Não só porque não nos é conhecida, com precisão, a frequência de atuação de todos os instrumentos usados como também não conhecemos os parâmetros da espécie da cultura em produção. No entanto, tanto há poupanças no custo operacional que não devem ser desprezadas como disponibilidade energética para manter a qualidade uniforme das culturas. Pois sabemos que parte desta energia consumida não entrará nos custos operacionais.

4.2.2 – Inclusão de um sistema de baterias no fornecimento elétrico da estufa

Pelo método da TRIZ, constatou-se que o campo F, definido como o sistema de produção elétrica da estufa agrícola, poderá não ser suficiente para a aplicação pretendida da estufa, sendo necessário aplicar a solução geral 4, da Fig. 2.11, das 7 soluções gerais, da Análise Substância - Campo, para melhorar o impacto do campo F com um campo F', que interaja com o sistema preenchendo positivamente a ineficiência do campo F que prejudicaria a conexão de S1 a S2. A energia solar só produz energia durante o dia. E por essa razão, deve dotar-se o sistema que assegure a fornecimento de energia durante a noite. Este melhoramento no campo irá fazer com que a EA não só utilize a energia durante o dia, mas armazene e forneça a energia que produziu em excesso durante o dia. Sistemas como o aquecimento, a ventilação ativa, humidificação e iluminação artificial são sistemas que idealmente deverão atuar preventivamente durante 24 horas.

A disponibilidade energética produzida deverá ser gasta para produção biológica em estufa. Ou seja, é mais rentável ao produtor gastar a energia gerada na sua estufa, que vender hipoteticamente essa energia à rede pública, sendo-lhe muito mais útil aplicar a energia gerada na produção de produtos biológicos, garantindo a qualidade das culturas, que vendê-la e voltar a comprar a eletricidade a um preço substancialmente mais caro. A remuneração da energia injetada na rede de acordo com a legislação vigente, considerando que o preço médio mensal do mercado ibérico de energia (OMIE - Operador de Mercado Ibérico de Energia) tem o valor típico de 0,05 €/kWh. Já o contrato de fornecimento de energia em baixa tensão especial, com dois períodos tarifários,

nomeadamente Vazio (englobando Vazio Normal e Super Vazio) e Fora de Vazio (englobando Ponta e Cheias), tem uma tarifa composta pelos seguintes termos (última tarifa em vigor de 2017):

- Tarifa de consumo Fora de Vazio: 0,1416 €/kWh.
- Tarifa de consumo Vazio: 0,0784 €/kWh.

A diferença de valores registados entre a venda e o consumo de energia elétrica incentiva sempre ao autoconsumo da eletricidade produzida. Isto é, a venda de energia elétrica durante o dia ao kWh nunca compensa a eletricidade comprada à rede pública, mesmo desprezando a inflação e os aumentos consecutivos do preço da eletricidade e, tendo em conta, as descidas do valor de compra de eletricidade no mercado OMIE, devido à crescente oferta de energia elétrica proveniente de produtores domésticos (Ex: produtores de energias renováveis). A necessidade de armazenar a energia produzida vai melhorar o nosso campo do nosso sistema. O diagrama da ligação elétrica, melhorado, está representado na Figura 4.27, ilustrando o percurso da energia elétrica produzida nos módulos até ao painel de distribuição de corrente alternada que irá alimentar os instrumentos da EAI.

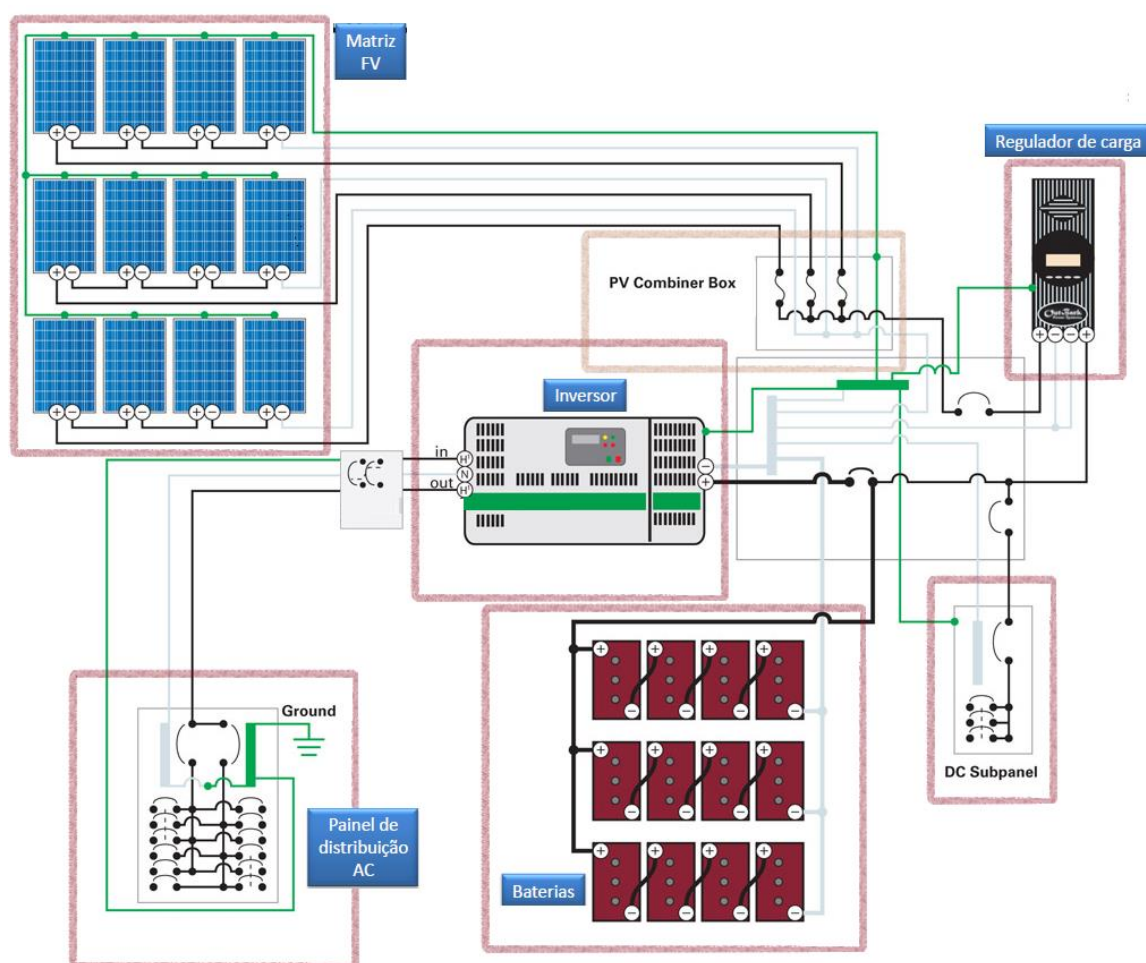


Figura 4.27 - Esquema do sistema elétrico *off-grid* da EA.

Por outro lado, mesmo com a produção de ano inteira assegurada, surgem os dias com uma irradiância muito inferior à necessária para se usufruir de energia elétrica. Dias chuvosos e de pouco aproveitamento solar que acontecem nos meses de Novembro, Dezembro e Janeiro. São situações que não são prejudiciais à produção biológica em estufa, mas com a produção elétrica ineficiente para esses determinados dias. Para os casos de necessidade energética insuficiente, recorreremos à análise Substância-Campo para introduzir no sistema em vigor um novo campo F2, que torna o sistema eficiente para produções biológicas uniformes para os dias em que o nível de luz não é suficiente para gerar a eletricidade necessária para acionar os mais diversos sistemas automáticos incluídos na EAI. A solução encontrada é descrita no subcapítulo seguinte.

4.2.3 – Ligação à rede pública de distribuição elétrica

Pelas razões explicadas anteriormente, neste sistema, há possibilidade nos dias de meses excepcionais, de se ter uma necessidade elétrica superior à energia elétrica produzida. Teremos, portanto, de recorrer à solução geral 6, Fig. 2.13, das 7 soluções gerais, da Análise Substância – Campo. Introduce-se um novo campo positivo F2 de modo a eliminar a ineficiência de F1' e aumentar deste modo o efeito útil deste campo. A inclusão de uma ligação elétrica à rede de distribuição apresenta-se como um forte benefício em termos de produção. Este campo F2, traz dois tipos de vantagens: (1) responder à necessidade energética em conjunto com a produção elétrica do campo F, para os dias onde a produção elétrica não consiga responder ao nível de produção exigido e (2) a possibilidade de vender energia elétrica à rede de distribuição pública, quando os níveis de produção elétrica superarem os níveis de demanda elétrica requeridos pela EA. Este novo campo servirá, portanto, para nivelar os níveis de produção biológica e rentabilizar os ganhos na produção elétrica. A ligação à rede é feita diretamente no painel de distribuição AC em ligação com contadores de entrada e saída de eletricidade. A Figura 4.28 mostra o sistema completo do modelo Substância – Campo desenvolvido, onde os atuadores, representados pelo conjunto das substâncias S1, asseguram a existência de um ambiente controlado, substância S2, através do seu campo F', representando a autoprodução energética que é complementada positivamente com F2.

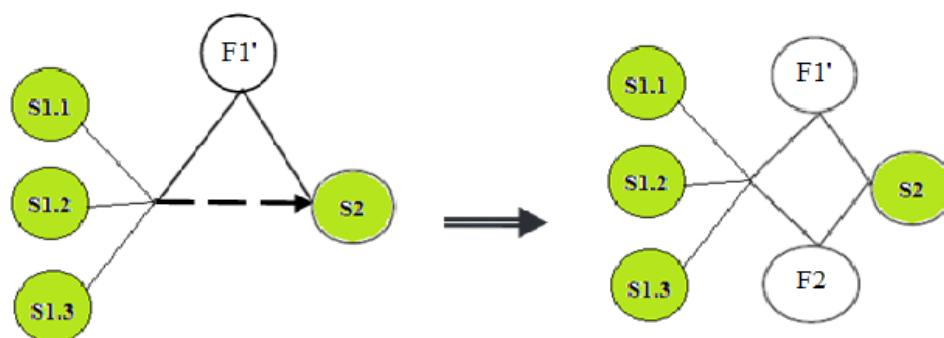


Figura 4.28 - Diagrama da solução final.

4.3 – Análise comparativa das estufas existentes e da estufa agrícola proposta

Antes de se proceder a uma comparação efetiva entre estufas agrícolas, é importante conhecer as suas poupanças a nível monetário, quando maximizamos a produção de energia elétrica na EAI. Caso que não acontece nas estufas convencionais, cujo lucro da produção biológica é automaticamente canalizado para pagar a estrutura. O valor monetário economizado relativo ao autoconsumo elétrico da estufa é indicado na Tabela 4.7, onde a informação está disposta para cada ano e para diferentes áreas de cobertura. Na Tabela 4.8, a poupança economizada ao longo de 5, 10 e 15 anos.

Tabela 4.7 – Custo operacional reduzido pelo autoconsumo elétrico na EAI.

Área (m ²)	Ano				
	2017	2018	2019	2020	2021
300	1.407,50 €	1.435,65 €	1.464,37 €	1.493,65 €	1.523,53 €
500	2.345,84 €	2.392,76 €	2.440,61 €	2.489,42 €	2.539,21 €
1000	4.691,68 €	4.785,51 €	4.881,22 €	4.978,85 €	5.078,43 €
1500	7.037,52 €	7.178,27 €	7.321,84 €	7.468,27 €	7.617,64 €
2000	9.383,36 €	9.571,03 €	9.762,45 €	9.957,70 €	10.156,85 €
3000	14.075,04 €	14.356,54 €	14.643,67 €	14.936,55 €	15.235,28 €
4000	18.766,72 €	19.142,05 €	19.524,90 €	19.915,39 €	20.313,70 €
5000	23.458,40 €	23.927,57 €	24.406,12 €	24.894,24 €	25.392,13 €
7500	35.187,60 €	35.891,35 €	36.609,18 €	37.341,36 €	38.088,19 €
10000	46.916,80 €	47.855,14 €	48.812,24 €	49.788,48 €	50.784,25 €
12500	58.646,00 €	59.818,92 €	61.015,30 €	62.235,60 €	63.480,32 €
15000	70.375,20 €	71.782,70 €	73.218,36 €	74.682,73 €	76.176,38 €
20000	93.833,60 €	95.710,27 €	97.624,48 €	99.576,97 €	101.568,51 €
25000	117.292,00 €	119.637,84 €	122.030,60 €	124.471,21 €	126.960,63 €

Tabela 4.8 - Redução do consumo da energia elétrica.

Área (m ²)	5 Anos	10 Anos	15 Anos
300	7.324,71 €	17.127,52 €	24.340,55 €
500	12.207,85 €	28.545,86 €	40.567,59 €
1000	24.415,69 €	57.091,72 €	81.135,18 €
1500	36.623,54 €	85.637,58 €	121.702,77 €
3000	73.247,07 €	171.275,16 €	243.405,53 €
4000	97.662,76 €	228.366,88 €	324.540,71 €
5000	122.078,46 €	285.458,59 €	405.675,89 €
7500	183.117,68 €	428.187,89 €	608.513,84 €
10000	244.156,91 €	570.917,19 €	811.351,78 €
12500	305.196,14 €	713.646,48 €	1.014.189,73 €
15000	366.235,37 €	856.375,78 €	1.217.027,67 €
20000	488.313,82 €	1.141.834,38 €	1.622.703,57 €
25000	610.392,28 €	1.427.292,97 €	2.028.379,46 €

Para o sistema de irrigação foi considerado uma bomba de 1.000 W de potência. Para o sistema de ventilação passiva foi considerado o uso de 3 motores de 370 W de potência. Para o sistema de ventilação ativa foi considerado o uso de 3 ventiladores com motores, cada um com 740 W de potência e capacidade de fluxo volumétrico para 37.000 m³·h⁻¹. No sistema de sombreamento, foi considerado o uso de 1 motor de 370 W de potência. Na Tabela 4.9 está indicado o tempo de utilização dos dispositivos elétricos e na Tabela 4.10 a sua potência consumida mensalmente e a percentagem de utilização por parte da EAI.

<i>Mês</i>	<i>Irrigação</i>		<i>Ventilação Passiva</i>		<i>Ventilação Ativa</i>		<i>Sombreamento</i>	
	<i>Nº de vezes (por dia)</i>	<i>Tempo de atuação (min)</i>	<i>Nº de vezes (por dia)</i>	<i>Tempo de atuação (min)</i>	<i>Nº de vezes (por dia)</i>	<i>Tempo de atuação Por dia</i>	<i>Nº de vezes (por dia)</i>	<i>Tempo de atuação (min)</i>
<i>Jan</i>	3	15/60	0	0	2	24	0	30
<i>Fev</i>	3	15/60	0	0	10	24	0	30
<i>Mar</i>	3	15/60	2	5/60	25	24	2	30
<i>Abr</i>	3	15/60	2	5/60	50	24	2	30
<i>Mai</i>	7	15/60	2	5/60	50	24	2	30
<i>Jun</i>	7	15/60	2	5/60	50	24	2	30
<i>Jul</i>	7	15/60	2	5/60	50	24	2	30
<i>Ago</i>	7	15/60	2	5/60	50	24	2	30
<i>Set</i>	7	15/60	2	5/60	24	24	2	30
<i>Out</i>	3	15/60	0	0	13	24	0	30
<i>Nov</i>	3	15/60	0	0	3	24	0	30
<i>Dez</i>	3	15/60	0	0	3	24	0	30

Tabela 4.10 - Distribuição do consumo de energia elétrica na EAI.

<i>Mês</i>	<i>Irrigação</i>		<i>Ventilação</i>		<i>Sombreamento</i>	
	<i>(kWh)</i>	<i>% energia usada (EAI)</i>	<i>(kWh)</i>	<i>% energia usada (EAI)</i>	<i>(kWh)</i>	<i>% energia usada (EAI)</i>
<i>Jan</i>	23,25	4,31	110,11	20,39	0	0,00
<i>Fev</i>	21	3,24	103,60	15,99	0	0,00
<i>Mar</i>	23,25	2,63	722,54	81,64	22,20	2,51
<i>Abr</i>	22,5	2,49	2780,48	307,24	22,20	2,45
<i>Mai</i>	54,25	5,37	2873,16	284,47	22,20	2,20
<i>Jun</i>	52,5	5,15	2780,48	272,60	22,20	2,18
<i>Jul</i>	54,25	5,02	2873,16	266,03	22,20	2,06
<i>Ago</i>	54,25	5,12	2873,16	271,05	22,20	2,09
<i>Set</i>	52,5	5,69	644,84	69,86	22,20	2,41
<i>Out</i>	23,25	2,98	193,84	24,88	0	0,00
<i>Nov</i>	22,5	3,88	9,99	1,72	0	0,00
<i>Dez</i>	23,25	4,59	10,32	2,04	0	0,00
<i>Total</i>	426,75		15.975,68		155,4	

Na Tabela 4.11, está indicada uma estimativa de custos relativos ao uso de energia elétrica para os sistemas enunciados anteriormente para a tarifa de consumo fora do vazio (0,1416 €/kWh). Verificou-se igualmente que existe um excesso de consumo nos dispositivos afetos ao sistema de ventilação ativa. É um valor que ultrapassa a capacidade de produção de energia pelo sistema fotovoltaico. Como o objetivo desta dissertação é criar uma EAI energeticamente autossustentável do ponto de vista elétrico, então deverá ser criado um sistema que permita reduzir ou suprimir esse gasto registado entre Abril e Agosto para o sistema de ventilação. Recorre-se novamente à ferramenta TRIZ para solucionar uma forma de otimização de energia no sistema de ventilação. O princípio inventivo identificado foi o número 35, Transformação do estado físico, sugerindo uma alteração na agregação do objeto. Como tal, criou-se uma janela na lateral da estufa (adição de mais 1 motor elétrico de 370 W) que permite uma ventilação mais eficiente sem ter que recorrer à ventilação ativa durante o dia. Como tal, os dispositivos afetos à ventilação ativa funcionarão apenas a metade do exigido anteriormente durante o dia, com uma utilização normal durante a noite, que é quando a janela lateral estiver totalmente fechada. Os resultados estão dispostos na coluna relativa à EA “inteligente” autossustentável. Conseguiu-se com sucesso reduzir essa necessidade e consequentemente o seu custo, tornando a estufa “inteligente” 100% autossustentável do ponto de vista elétrico para os recursos básicos requeridos para uma estufa.

Tabela 4.11 - Custos operacionais relativos ao consumo de energia elétrica.

Área (300 m ²)	Percentagem de energia usada pela EAI relativamente à eletricidade produzida (%)	<i>High Tech</i> (€)	EA “inteligente” (€)	EA “inteligente” autossustentável	
				Percentagem de energia utilizada (%)	Custo Operacional (€)
<i>Jan</i>	24,70	18,88	0,00	24,70	0
<i>Fev</i>	19,23	17,64	0,00	19,23	0
<i>Mar</i>	86,78	108,75	0,00	86,99	0
<i>Abr</i>	312,17	400,05	271,90	82,41	0
<i>Mai</i>	292,04	417,66	274,65	79,30	0
<i>Jun</i>	279,92	404,29	259,86	76,06	0
<i>Jul</i>	273,11	417,66	264,74	74,16	0
<i>Ago</i>	278,27	417,66	267,57	75,56	0
<i>Set</i>	77,96	101,89	0,00	78,16	0
<i>Out</i>	27,87	30,74	0,00	27,87	0
<i>Nov</i>	5,60	4,60	0,00	5,60	0
<i>Dez</i>	6,63	4,75	0,00	6,63	0
Total		2.344,59 €	1.338,71 €	59,95	0

O resultado alcançado demonstra que a estufa “inteligente” consegue reduzir o seu custo elétrico operacional em cerca de 43%. É uma diferença de 2.344,59 € relativamente a uma estufa de alta tecnologia. A esta conclusão junta-se a informação recolhida através de *outsourcing* a vários produtores em que os números apresentados na Tabela 4.7 sobrepuseram-se aos valores pagos na

fatura da eletricidade desses mesmos produtores. Isto significa que há excesso de produção de energia. Portanto, poderá haver um maior aproveitamento da energia produzida por parte dos produtores. Também surge a hipótese de vender energia à rede como também poderá ser feito um dimensionamento ajustado ao consumo de eletricidade para o produtor.

4.3.1 - Caso Prático: Uniformização de produção para o ano inteiro

Área do terreno: 300 m²,

Localização: Lisboa, Portugal,

Cultura em produção: *Solanum lycopersicum* (Tomate),

Condições exigidas para produção de qualidade:

Começamos por comparar as duas estufas (High Tech vs EAI) para o caso prático de produção para o ano inteiro. Isto é, assumir-se-á a capacidade de produção igual para ambas as estufas cujo cultivo é produzido de uma forma constante e de qualidade uniforme todos os meses. As condições de produção estão indicadas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Condições de produção.

	Horas de sol	Temp. Min	Temp. Max	Humidade
<i>Mês</i>	(h)	(°C)	(°C)	(%)
<i>Jan</i>	4,1	8	14	82
<i>Fev</i>	6,4	9	16	76
<i>Mar</i>	4,1	11	18	74
<i>Abr</i>	8,9	12	20	72
<i>Mai</i>	10,1	14	22	71
<i>Jun</i>	10,6	17	27	66
<i>Jul</i>	11	18	28	65
<i>Ago</i>	11,2	19	29	66
<i>Set</i>	9,1	18	27	71
<i>Out</i>	6,2	15	22	76
<i>Nov</i>	5,8	11	17	77
<i>Dez</i>	5,3	9	14	83

A comparação para este caso prático terá em conta a potência combinada dos dispositivos automáticos na estufa, os seus gastos elétricos e a potência nominal de produção elétrica. A informação relativa aos dispositivos utilizados nesta comparação está indicada na Tabela 4.13. A potência exigida para o sistema de iluminação da estufa *high tech* (HT), definiu-se para os mesmos valores da estufa “inteligente” em estudo.

Tabela 4.13 – Dados relativos ao equipamento utilizado nas duas estufas.

		EA “Inteligente”		High Tech	
	W	Qt	Total (kW)	Qt	Total (kW)
Ventilação Passiva	370	4	1.470	3	1110
Ventilação Ativa	740	3	2.220	3	2.220
Iluminação*	250	80	16.000	80	16.000
Sombreamento	370	1	370	n	
Humidificação	370	1	370	1	370
Irrigação	1000	1	1000	1	1000
Monotorização	200	1	200	n	
Produção Elétrica (Wp)			6.624	n	
Dimensão (m ²)			300		300
Capacidade para permacultura			s	n	
Recursos Humanos			2		4*

Legenda: n –não disponível; s –disponível; *número de trabalhadores de uma estufa *high tech* (Maruo, 2012).

Numa primeira análise, a comparação é feita quando se utilizam os dispositivos básicos e essenciais à produção numa estufa agrícola. Para este caso, a comparação é feita quando se recorre ao sistema de iluminação artificial para nivelar a qualidade de produção para o ano todo. Foi calculada a energia necessária para produção de tomate cujo parâmetro de luz artificial contempla as 8 horas de luz diária mínima exigida pelos tomateiros. Esses cálculos foram realizados tendo em conta o requerimento de PPFD para a plantação de tomate na faixa dos 100-200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ reportados por Verheul, indicados no subcapítulo 4.2. Foi igualmente calculado o custo do gasto energético em excesso requerido para a produção do parâmetro de luz estipulado em ambas as estufas. As horas de sol médias em Lisboa são relativas ao ano de 2013. O dispositivo de LED usado (Anexo A) exige 200 Watts de potência para a produção de 520 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Tendo em conta a faixa de PPFD, estipulamos que cada metro quadrado deverá receber 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. Feitos os cálculos, são necessárias 80 lâmpadas LED, cuja potência elétrica total é de 16 kW para o sistema de iluminação artificial. Dos 12 meses do ano de produção, só serão necessários 6 meses no uso deste sistema. Porém, há diversas formas de aplicar esta luz suplementar (i.e. a aplicação de luz artificial no Verão para complementar as 16 horas de exposição luminosa). Neste caso, o objetivo é uniformizar a produção anual e comparar os seus gastos. Os resultados estão indicados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Comparação da EAI com uma estufa High Tech.

A= 300 m ²		Iluminação		Energia usada pela EA “Inteligente” na culturas (%)	Custo mensal à tarifa de consumo fora do vazio (0,1416 €)	
	Produção elétrica mensal (kWh)	Para perfazer 8 horas mínimas (h)	Eletricidade requerida mensalmente (kWh)		High Tech	EA “Inteligente”
Jan	540	3,9	1934,4	358,22	273,91 €	197,45 €
Fev	648	1,6	716,8	110,62	101,50 €	9,74 €
Mar	885	3,9	1934,4	218,58	273,91 €	148,60 €
Abr	905	0	0	0,00	- €	- €
Mai	1010	0	0	0,00	- €	- €
Jun	1020	0	0	0,00	- €	- €
Jul	1080	0	0	0,00	- €	- €
Ago	1060	0	0	0,00	- €	- €
Set	923	0	0	0,00	- €	- €
Out	779	1,8	892,8	114,61	126,42 €	16,11 €
Nov	580	2,2	1056	182,07	149,53 €	67,40 €
Dez	506	2,7	1339,2	264,66	189,63 €	117,98 €
Total	9.936		7.873,6		1.114,90 €	557,28 €

A comparação final dos custos elétricos é indicada na Tabela 4.15, onde se junta à comparação dos dados calculados para os gastos elétricos dos sistemas de irrigação, ventilação e sombreamento.

Tabela 4.15 - Comparação dos custos elétricos para a produção de tomate.

Área = 300 m ²	Percentagem de energia usada pela EA “inteligente” relativamente à eletricidade produzida (%)	High Tech	EAI
Jan	350,13	292,79 €	216,33 €
Fev	161,00	119,14 €	27,38 €
Mar	257,70	382,66 €	257,62 €
Abr	130,01	400,05 €	105,60 €
Mai	233,94	417,66 €	113,41 €
Jun	224,18	404,29 €	109,85 €
Jul	218,78	417,66 €	113,41 €
Ago	222,91	417,66 €	113,41 €
Set	151,53	101,89 €	102,15 €
Out	195,15	157,16 €	46,85 €
Nov	187,97	154,13 €	72,00 €
Dez	267,05	194,38 €	122,73 €
Total		3.459,47 €	1.400,73 €

O resultado demonstra que a estufa “inteligente” consegue reduzir o seu custo elétrico operacional em cerca de 59,6% quando comparado com o gasto elétrico de uma estufa de alta tecnologia, quando o propósito é produzir tomate para o ano inteiro. A capacidade de autonomia também irá reduzir os custos operacionais da mesma, uma vez que não são necessários tantos funcionários para executar o mesmo trabalho que é controlado por sistemas automáticos numa estufa convencional de alta tecnologia.

Tabela 4.16 - Retorno Financeiro

Preço luz	Ano	EAI/m ²	HT/m ²	Lucro EAI (€)	Lucro Ht (€)	CO EAI	CO HT	Dif €	Margem		Breakeven	
									EAI	HT		
0,1416	2017	36	28	10800	8400	1400,73	3459	2058,27	9399,27	4941	-63 738,00 €	-30 000,00 €
0,14443	2018	36,72	28,56	11016	8568	1428,74	3528,18	2099,44	9587,26	5039,82	-54 338,73 €	-25 059,00 €
0,14732	2019	37,45	29,13	11236,32	8739,36	1457,32	3598,74	2141,42	9779	5140,62	-34 972,47 €	-14 878,56 €
0,15027	2020	38,2	29,71	11461,05	8914,15	1486,47	3670,72	2184,25	9974,58	5243,43	-24 997,89 €	-9 635,13 €
0,15327	2021	38,97	30,31	11690,27	9092,43	1516,2	3744,13	2227,94	10174,07	5348,3	-14 823,82 €	-4 286,84 €
0,15634	2022	39,75	30,91	11924,07	9274,28	1546,52	3819,02	2272,5	10377,55	5455,26	-4 446,27 €	1 168,43 €
0,15946	2023	40,54	31,53	12162,55	9459,76	1577,45	3895,4	2317,95	10585,1	5564,37	6 138,84 €	6 732,79 €
0,16265	2024	41,35	32,16	12405,81	9648,96	1609	3973,3	2364,31	10796,81	5675,66	16 935,64 €	12 408,45 €
0,16591	2025	42,18	32,81	12653,92	9841,94	1641,18	4052,77	2411,59	11012,74	5789,17	27 948,39 €	18 197,62 €
0,16923	2026	43,02	33,46	12907	10038,78	1674	4133,83	2459,82	11233	5904,95	39 181,38 €	24 102,57 €
0,17261	2027	43,88	34,13	13165,14	10239,55	1707,48	4216,5	2509,02	11457,66	6023,05	50 639,04 €	30 125,62 €
0,17606	2028	44,76	34,81	13428,44	10444,34	1741,63	4300,83	2559,2	11686,81	6143,51	62 325,85 €	36 269,14 €
0,17958	2029	45,66	35,51	13697,01	10653,23	1776,46	4386,85	2610,38	11920,55	6266,38	74 246,40 €	42 535,52 €
0,18317	2030	46,57	36,22	13970,95	10866,3	1811,99	4474,59	2662,59	12158,96	6391,71	86 405,36 €	48 927,23 €
0,18684	2031	47,5	36,95	14250,37	11083,62	1848,23	4564,08	2715,84	12402,14	6519,54	98 807,49 €	55 446,77 €

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

A agricultura encontra-se num contexto difícil com alterações legislativas a nível europeu mais restritas, associadas a uma premente necessidade de reduzir custos operacionais ao mesmo tempo que se exige melhor qualidade de produtos biológicos. Vivemos em tempos de certificação rigorosa e credível, indispensável para manter a confiança dos consumidores. A competição económica dos mercados pede eficiência aos produtores, numa atenção que deve ser redobrada sobre as culturas em produção.

A nível estrutural, é importante dar robustez à estufa e reduzir a probabilidade de surgir um colapso estrutural na ocorrência de intempéries. Os prejuízos arruinam os produtores e aumentam a despesa das seguradoras. É também importante aumentar o nível tecnológico de produção para se conseguir produzir tudo em qualquer sítio. Ou seja, em termos concretos, é necessário encontrar uma forma que permita diminuir despesas e custos e aumentar a produção e os seus lucros, garantindo qualidade.

As inovações introduzidas no desenvolvimento de uma estufa “inteligente” com recurso às ferramentas analíticas da Teoria da Resolução Inventiva de Problemas, tal como proposto nesta dissertação, provaram ser uma boa solução para os objetivos estipulados inicialmente. O resultado alcançado traz um potencial enorme para a exigência da produção comercial e para a importância que existe no conceito de cultivo ecológico. Controlar uma grande produção agrícola através de um único dispositivo eletrónico e ajustar os seus parâmetros ambientais deixando esse controlo ao sistema de monitorização da estufa agrícola, traz uma série de vantagens para a produção agrícola industrial. Os parâmetros ambientais, na sua maioria, foram controlados de uma forma sustentável para o produtor. O objetivo, para além dos benefícios enunciados anteriormente, é dotar as culturas agrícolas de uma maior precisão em termos de qualidade, estabilidade de fruto, melhoria de produção de plantas e de autonomia, sem que haja dependência de uma rede elétrica, dependência das características ambientais de uma região e dependência dos prejudiciais pesticidas.

O presente trabalho pretendeu desenvolver e configurar uma estufa capaz de, por um lado, suportar e fornecer a quase totalidade de energia elétrica requerida para a produção biológica, reduzindo os gastos no consumo elétrico nos sistemas de irrigação, ventilação, sombreamento e iluminação; e, por outro lado, abrir portas para a sua aplicação na vertente doméstica, onde o excedente de eletricidade produzido nas práticas agrícolas poderá ser utilizado no consumo elétrico de uma casa familiar ou mesmo vender à rede de distribuição nacional.

O novo modelo de estufa possibilita também uma taxa de sobrevivência de plantas superior à existente em estufas convencionais. Concentra a energia solar na produção agrícola e no controlo do crescimento das plantas e potencia o fotoperíodo, aumentando o número de produções ao ano, dando, assim, maior competitividade ao produtor. Pela robustez da estrutura e vida útil dos painéis solares, prevê-se que a estufa idealizada tenha uma duração operacional de 20 a 25 anos de trabalho ininterrupto com uma manutenção bastante económica.

É esperada independência energética da estufa e no caso do estudo apresentado, foi possível estimar uma redução de cerca de 50% de consumo de energia elétrica relativamente às estufas tecnologicamente avançadas existentes no mercado, e uma redução total do consumo elétrico para produções agrícolas mais simples. O trabalho continuará a ser desenvolvido e consolidado.

5.1 – Trabalho futuro

O próximo passo para a consolidação deste projeto será a construção de um protótipo, que já se encontra em desenvolvimento. Estão a ser realizados contactos com fornecedores e produtores a fim de se criar uma parceria para a construção de uma estufa agrícola “inteligente” para a realização de testes do protótipo. Numa segunda fase deste projeto, tornar a estufa “inteligente” completamente autossustentável para suportar os gastos elétricos do sistema de luz artificial integral para os meses de Inverno, a fim de aumentar a produção para níveis substanciais neste período. E numa terceira fase, melhorar técnicas agrícolas de modo a extrair a máxima rentabilidade da estufa agrícola “inteligente” eletricamente autossustentável.

BIBLIOGRAFIA

- Altshuller, G. 2004. *And Suddenly the Inventor Appeared*. edited by S. Shulyak, Lev; Rodman. Worcester, MA: Technical Innovation Center, Inc.
- Altshuller, G. 2007. *The Innovation Algorithm*. 2nd ed. Worcester, MA: Technical Innovation Center, Inc.
- Altshuller, G. 1999. *Tools of Classical TRIZ*. Ideation International Incorporated.
- Altshuller, G., Shulyak, L, Rodman, S. 2002. *40 Principles: TRIZ Keys to Technical Innovation*. Worcester, MA: Technical Innovation Center, Inc.
- Argus Controls Systems, 2010. *Light and lighting control in greenhouses*, ACS, Ltd. Canada.
- Associação Nacional de Cruzeiros, 2014. *Percurso solar*. Retrieved November 11, 2016 (<http://www.ancruzeiros.pt/ancdrp/nascimento-e-ocaso-do-sol>).
- Atelier Yann Arthus-Bertrand, 2016. *The Greenhouses of Almeria*. Almeria, Retrieved February 26, 2016 (<http://www.yannarthusbertrand2.org>).
- Bailey, B. 1984. *Limiting the relative humidity in insulated greenhouses at night*, Acta hort, ISHS - International Society for Horticultural Science.
- Bartok, J. 2001. *Energy Conservation for Commercial Greenhouses*, Revision. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service Cooperative Extension.
- Bartok, J. 2000. *Greenhouses for Homeowners and Gardeners*, NRAES-137, Ithaca, New York. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service Cooperative Extension.
- Bidlack J., Stern K., Jansky S. 2003. *Introductory plant biology*, New York, McGraw-Hill.
- Bouzo, C., Norberto, F., Gariglio, J. 2009. *Recursos utilizados en clases - Tipos de Invernaderos*, Esperanza.
- Buffington, D., Bucklin, R., Henley, R., McConnell, D. 1987. *Greenhouse Ventilation*, Gainesville, Florida.
- Costa, J., Palha, M., Vargues, A., Ferreira, M., Almeida, D. 2010. *Culturas protegidas: um investimento para o século 21?* Lisboa.
- Critten, D., Bailey, B. 2002. *A review of greenhouse engineering developments during the 1990s*, Agricultural and Forest Meteorology.
- Elsner, B. von, Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., Zabeltitz, Chr. Von, Gratraud, J., Russo, G. and Suay-Cortes, G. 2000. *Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, part II: typical designs*. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 75. n.º 2.
- Fey, V. 2004. *Why Does TRIZ Fly But Not Soar*, Future TRIZ Conference, Florença, Itália.

- Gadd, K. 2011. *TRIZ For Engineers: Enabling Inventive Problem Solving*, Oxford, John Wiley & Sons, Ltd.
- Giacomelli, G., Roberts, A., William, J. 1993. *Greenhouse covering systems*, HortTechnology, Vol. 3, n.º 1, p. 50-58.
- Goldberg, D. 2004. *The TRIZ Method*, University of Illinois.
- GREENPRO, *Energia Fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projeto e instalação*, Manual resultante do projeto, 2004 (<http://www.greenpro.de/po/index.html>).
- Hadley, P. 2002. *The efficient use of lighting in bedding plant production*, The University of Reading.
- Hall, D., Rao, K. 1999. *Photosynthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 8–9.
- Hernández, J., Parra, C., Pérez, J. 2006. *Evolución de las estructuras de invernadero*, Almeria: Cajamar.
- Heuvelink, E., Bakker, M. 2005 *Climate and Yield in a Closed Greenhouse*, Wageningen University, Netherlands.
- Hortidaily, 2015. *Modern Greenhouses*. Retrieved December 20, 2016 (<http://www.hortidaily.com/article/23881/International-High-Tech-Greenhouse-2020-in-Holland>).
- Hortinet, 2014. *How to build an economical greenhouse*. Retrieved December 19, 2016 (<http://hortinet.info/tag/temporal>)
- IFOAM EU, 2013. *Position paper on organic greenhouse production*, Retrieved February 3, 2016(http://eu.ifoam.org/sites/default/files/page/files/ifoameu_reg_greenhouse_production_position_201302.pdf).
- IPMA, 2017. IPMA - Instituto Português do Mar e Atmosfera (<http://www.ipma.pt/pt/oclima/extremos.clima>)
- Jamali, K., Hashmi, S. 2010. *Managing Projects through the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ)*, International Research Journal of Finance and Economic.
- JRC Serres, 2016. Serres JRC Ltd. . Retrieved December 10, 2016 (<https://www.serres-jrc.com/tous-nos-produits/pepiniere/produits-pepiniere/87-bi-tunnel-960m-atlantique.html>).
- Kendirli, B. 2006. *Structural analysis of greenhouses: A case study in Turkey*, Building and Environment, Vol. 41, n.º 7.
- Kumar, K., Tiwari, K., Madan, K. 2009. *Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review*. *Energy and Buildings*, Vol. 41. n.º 12.
- Marques, J. 2014. *Aplicação da Metodologia TRIZ e da Manutenção Autônoma em Atividades de Manutenção Industrial*.
- Maruo, T. 2012. *The Current Situation and Future Prospects of Plant Factories*; Graduate School of Horticulture, Chiba University.

Mitchell, C., Gómez, C., Morrow, R., Bourget M., Massa, G. 2013. *Comparison of Intracanopy Light-emitting Diode Towers and Overhead High-pressure Sodium Lamps for Supplemental Lighting of Greenhouse-grown Tomatoes*, Purdue University, Indiana.

Molina, J. 2013. *Metodologia TRIZ Aplicada ao Desenvolvimento do Conforto Acústico em Aeronaves Comerciais*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Muñoz, P., Assumpció, A., Montero, I. 2013. *Tendencias en la construcción de invernaderos: normas cen y une sistemas de control ambiental y posibilidades de macenización de operaciones de cultivo y riego*, Barcelona

Navas, H. 2011. *Inovação Sistemática e Manutenção Lean*. Manutenção, Nº110/111, 3º e 4º Trimestres, 73–75.

Navas, H. 2013a. *TRIZ Uma Metodologia Para a Resolução de Problemas*. Guia de Empresas Certificadas, Cempalavras Comunicação Empresarial, Lda, Lisboa.

Navas, H. 2013b *TRIZ: Desing Problem with Systematic Innovation*. Em D. A. Coelho, *Advances in Industrial Design Engineering*. InTech.

Navas, H. 2014a. *Fundamentos Do TRIZ -Parte I -Necessidade de Resolver Problemas*. Inovação & Empreendedorismo Newsletter nº 50.

Navas, H. 2014b. *Fundamentos Do TRIZ -Parte II -Níveis de Inovação*. Inovação & Empreendedorismo Newsletter nº 51 - Maio 2014 - Vida Económica

Navas, H. 2014c. *Fundamentos Do TRIZ -Parte IV -Análise de Recursos*. Inovação & Empreendedorismo Newsletter nº 53 - Julho 2014 -Vida Económica.

Navas, H. 2014d. *Fundamentos Do TRIZ -Parte VI -Aplicação de Bases de Dados de Causas E Efeitos*. Inovação & Empreendedorismo Newsletter nº 55 - Outubro 2014 -Vida Económica.

Navas, H. 2014e. *Fundamentos Do TRIZ -Parte VII -Modelo Substância-Campo*. Inovação & Empreendedorismo, Newsletter nº 57 - Dezembro 2014 -Vida Económica.

Navas, H. 2014f. *Radical and Systematic Eco-innovation with TRIZ Methodology*. Em S. G. Azevedo, M. Brandenburg, H. Carvalho and V. C. Machado, *Eco-Innovation and the Development of Business Models* (p. 81-95), Springer, 2014.

Navas, H. 2015. *Fundamentos Do TRIZ -Parte IX -Algoritmo de Resolução Inventiva de Problemas*. Inovação & Empreendedorismo Newsletter nº 58 -Janeiro 2015-Vida Económica.

Navas, H., Machado, V. 2013 *Systematic Innovation in a Lean Management Environment*. Industrial and Systems Engineering Research Conference, Porto Rico.

Navas, H., V. Machado. 2011. *The Lifeline of Technical Systems in a TRIZ-LEAN Environment*. in ETRIA TRIZ Future 2011. Dublin, Ireland.

Nova Agrícola, 2013. *Inovação técnica para agricultura*. Retrieved November 19, 2016 (<http://novaagricola.blogspot.pt/2013/03/fertittgacao-em-estufa.html>).

Pardossi, A., Tognoni, F., Incrocci, L. 2004. *Mediterranean greenhouse technology*, Chronica Hort, Vol. 44, n.º 2.

- Pereira, F., Oliveira, M. 2011 *Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica*, Publindústria, Lisboa.
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E. 2014. *Greenhouse Design e Control*. Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de Mexico, Mexico City.
- PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System. 2017. Retrieved January 14, 2017 (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>).
- Rabinowitch, E. and Govindjee. A. 1969. *Photosynthesis*, J. Wiley, London.
- Ramos, C. 2015. *Aplicação da Metodologia TRIZ numa Indústria Alimentar*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Rantanen, K., Domb, E. 2010. *Simplified TRIZ: New Problem Solving Applications for Engineers and Manufacturing Professionals*, Second Edition, Taylor & Francis.
- Sanford, S. 2011. *Reducing greenhouse energy consumption*, University of Wisconsin.
- Savransky, S. D. 2000. *TRIZ Overview*. Em S. D. Savransky, *Engineering of Creativity - Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving*, CRC Press, p. 21-29.
- Solanki, C. 2011. *Solar Photovoltaics, Fundamentals, Technologies and Applications*, Phi Learning, 2nd ed.
- Soler Palau Ltd, 2015. *Greenhouse Ventilation*. Retrieved November 14, 2016 (http://www.solerpalau.pt/formacion_01_39.html).
- Taiz, L., Zeiger, E. 2002. *Plant Physiology*, Sinauer Associates, 3rd edition.
- Tecmundo Magazine, 2016. Retrieved November 18, 2016 (<https://i.embed.ly/1/display/resize?key=1e6a1a1efdb011df84894040444cdc60&url=http%3A%2F%2Fsagamer.co.za%2Fimg%2Fevolution-phone.jpg&width=810>)
- Terninko, J., Domb, E., Miller, J. 2007. *The Seventy-Six Standard Solution, With Examples*, The TRIZ Journal.
- Vázquez, J., Pérez, P., Callejón, A., Carreño, A. 2011. *Diseño de un nuevo capitel para invernaderos multitúnel*, Informes de la Construcción. Vol. 63, n.º 521.
- Verheul M., Maessen H., Grimstad S. 2012. *Optimizing a year-round cultivation system of tomato under artificial light*, Acta Horti, 956, p. 389-394.
- Waaijenberg, D. 2004, *Design, construction and maintenance of greenhouse structures*, Agrotechnology & Food Innovations, Netherlands.
- Walker, J., Duncan, G. 1973. *Greenhouse structures*, University of Kentucky - Department of Agricultural Engineering.
- Woerden, S., Bakker, J. 2000 *Quantitative Information. Applied Plant Research*, Naaldwijk, Netherlands.

ANEXOS

Anexo A - Especificações do LED usado no sistema de iluminação

Ordering information GreenPower LED toplighting

The unique GreenPower LED toplighting - product range has been fully released in accordance with all safety regulations and has been tested against IEC 60598 by a certified approbation body (Dekra). Philips has designed several types according to a best practice recipe. This is the outcome of many tests and studies with LEDs we have carried out in recent years in conjunction with universities and growers.

Product specifications and ordering data GreenPower LED toplighting

Philips GreenPower LED toplighting		Photon flux ^{1) 2)} μmol/s	Power consumption (typical) ²⁾ W	Ordering code
HIGH OUTPUT	Deep red/blue (DR/B)			
	GreenPower LED toplighting mod. DR/B LB 400V	520	190	9290 009 88506
	GreenPower LED toplighting mod. DR/B MB 400V	520	195	9290 009 88606
	GreenPower LED toplighting mod. DR/B HB 400V	520	200	9290 009 88706
	Deep red/white (DR/W)			
	GreenPower LED toplighting mod. DR/W LB 400V	520	195	9290 009 88806
	GreenPower LED toplighting mod. DR/W MB 400V	520	200	9290 009 88906
	GreenPower LED toplighting mod. DR/W Vision 400V	430	190	9290 009 89006
	Deep red/white/far red (DR/W/FR)			
	GreenPower LED toplighting mod. DR/W/FR_2 MB 400V	410	175	9290 009 89106
REGULAR	Deep red/blue (DR/B)			
	GreenPower LED toplighting module DR/B LB 400V	440	190	9290 008 82206
	GreenPower LED toplighting module DR/B MB 400V	440	195	9290 008 82106
	GreenPower LED toplighting module DR/B HB 400V	440	200	9290 008 82006
	Deep red/white (DR/W)			
	GreenPower LED toplighting module DR/W LB 400V	440	195	9290 008 81906
	GreenPower LED toplighting module DR/W MB 400V	440	200	9290 008 85106
	GreenPower LED toplighting module DR/W VISION 400V	400	190	9290 009 58906
	Deep red/white/far red (DR/W/FR)			
	GreenPower LED toplighting module DR/W/FR_2 MB 400V	360	180	9290 009 59006
Accessories				
GreenPower LED toplighting mounting bracket (continuous line) ³⁾				9290 015 07906
GreenPower LED toplighting mounting bracket (non-continuous line)				9290 009 15206
GreenPower LED toplighting jumper cable (1,0 mtr) ⁴⁾				9290 009 15306
GreenPower LED toplighting jumper cable (2,0 mtr) ⁴⁾				9290 009 16006
GreenPower LED toplighting male connector				9290 009 15406
GreenPower LED toplighting female connector				9290 009 15506
GreenPower LED toplighting end cap ⁵⁾				9290 009 15606

¹⁾ Lifetime is given at an ambient temperature of 25 °C rated life to 90% of initial photon flux - 25 khrs.

²⁾ Photon flux and Power consumption values are typical at stable operation at an ambient temperature of 25 °C.

³⁾ Stainless steel ø2.0 mm wire clip including 'locking plate' to fix the modules in an axial direction to prevent the modules working loose as a result of vibrations.

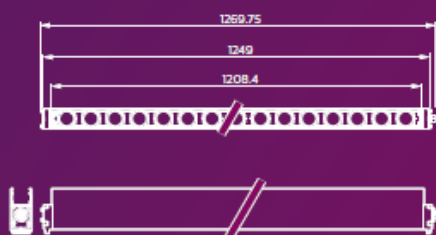
⁴⁾ 3 x 1.5 mm² conductors, 2-sided 'male / female' connector.

⁵⁾ To ensure IP66 rating for every single mounted or last module in a continuous line.

The accessories will be determined per project. This is due to the fact that it depends on the lighting design required for your crop. Please contact your local Philips representative for advice.

Dimensions GreenPower LED toplighting

Product	Dimensions (in mm)		
	Length	Width	Height
GreenPower LED toplighting module	1269.75	50	110
GreenPower LED toplighting module mounting bracket (continuous line)	118	85	47.5
GreenPower LED toplighting module mounting bracket (non-continuous line)	102	55	35.7



GreenPower LED toplighting module mounting bracket (continuous line)



GreenPower LED toplighting module mounting bracket (non-continuous line)

Anexo B - Produção fotovoltaica de uma EA de 300 m²

Performance of Grid-connected PV

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°43'20" North, 9°8'21" West, Elevation: 62 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 6.6 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature and low irradiance: 10.8% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.7%

Other losses (cables, inverter etc.): 14.0%

Combined PV system losses: 25.3%

Fixed system: inclination=28 deg., orientation=0 deg.				
Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	17.40	540	3.34	103
Feb	23.10	648	4.49	126
Mar	28.50	885	5.66	176
Apr	30.20	905	6.08	182
May	32.50	1010	6.61	205
Jun	33.90	1020	7.05	211
Jul	34.90	1080	7.34	227
Aug	34.30	1060	7.22	224
Sep	30.80	923	6.40	192
Oct	25.10	779	5.07	157
Nov	19.30	580	3.81	114
Dec	16.30	506	3.16	97.9
Year	27.20	828	5.52	168
Total for year		9940		2020

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Anexo C - Produção fotovoltaica de uma EA de 150 m²

Performance of Grid-connected PV

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°43'20" North, 9°8'21" West, Elevation: 62 m a.s.l.,
Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 3.3 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature and low irradiance: 10.8% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.7%

Other losses (cables, inverter etc.): 14.0%

Combined PV system losses: 25.3%

Fixed system: inclination=28 deg., orientation=0 deg.				
Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	8.71	270	3.34	103
Feb	11.60	324	4.49	126
Mar	14.30	443	5.66	176
Apr	15.10	452	6.08	182
May	16.20	504	6.61	205
Jun	17.00	509	7.05	211
Jul	17.50	541	7.34	227
Aug	17.10	532	7.22	224
Sep	15.40	462	6.40	192
Oct	12.60	390	5.07	157
Nov	9.67	290	3.81	114
Dec	8.16	253	3.16	97.9
Year	13.60	414	5.52	168
Total for year		4970		2020

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Anexo D - Especificações do vidro fotovoltaico

Tabela A.1 - Especificações do vidro fotovoltaico

PHOTOVOLTAIC GLASS		636BN-12451849- 1245 x 1849 mm			
		ref.00	ref.0	ref.20	ref.30
Electrical data test conditions (STC)					
		DARK (0%)	M VISION (10%)	L VISION (20%)	XL VISION (30%)
Nominal peak power	P_{max} (W)	133	92	78	64
Open-circuit voltage	V_{oc} (V)	144	144	144	144
Short-circuit current	I_{sc} (A)	1,50	1,15	0,97	0,77
Voltage at nominal power	V_{mp} (V)	99	99	99	99
Current at nominal power	I_{mp} (A)	1,34	0,93	0,79	0,65
Power tolerance not to exceed	%	±5	±5	±5	±5
STC: 1000 W/m² AM 1.5 and a cell temperature of 25°C, standard module data.					
Mechanical description					
Length	mm	1245			
Width	mm	1849			
Thickness	mm	16,72 / 14,72 / 12,72			
Surface area	sqm	2,30			
Weight	kg	87,4 / 75,9 / 64,4			
Cell type		a-Si Thin Film			
Front Glass		6 / 5 / 4 mm Tempered Glass			
PV Glass		3,2 mm Float Glass			
Rear Glass		6 / 5 / 4 mm Tempered Glass			
Thickness encapsulation	ref. A	EVA Foils (not available)			
	ref. B	1,52 mm PVB Foils			

Junction Box	
Protection	IP65
Wiring Section	2,5 mm² / 4,0 mm²
Units	
Maximum system voltage	V_{sys} (V)
Operating module temperature	°C
	-40...+85
Temperature Coefficients	
Temperature Coefficient of P_{max}	1/°C
Temperature Coefficient of V_{oc}	1/°C
Temperature Coefficient of I_{sc}	1/°C
	-0,19
	-0,28
	+0,09

PV GLASS DIMENSIONS

1245 mm (10%)

1849 mm (10%)

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

10 mm

<



